

PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO

**MODELO REGIONAL DA IONOSFERA PARA USO
EM POSICIONAMENTO COM
RECEPTORES GPS DE UMA FREQUÊNCIA**

Tese apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Doutor. Curso
de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas,
Setor de Ciências da Terra, Universidade
Federal do Paraná.

Orientadores:

Prof. Dr. João Francisco Galera Monico

Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira

CURITIBA

1999

**“MODELO REGIONAL DA IONOSFERA PARA USO EM
POSICIONAMENTO COM RECEPTORES GPS DE UMA
FREQUÊNCIA”**

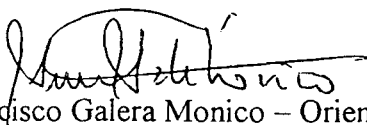
POR

PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO

Tese nº 014 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



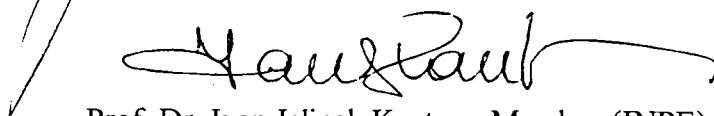
Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira - Orientador e Presidente (UFPR)



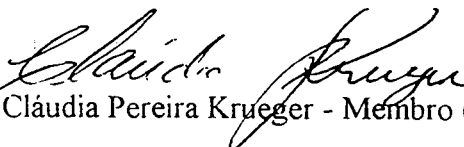
Prof. Dr. João Francisco Galera Monico – Orientador (UNESP)



Prof. Dr. José Bittencourt de Andrade - Membro (UFPR)



Prof. Dr. Ivan Jelinek Kantor - Membro (INPE)



Profª. Drª. Cláudia Pereira Krueger - Membro (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de externar meus agradecimentos aos que cooperaram e deram suporte para a realização desta pesquisa:

- Aos orientadores Prof. Dr. João Francisco Galera Monico, da UNESP, e Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira, da UFPR;
- Ao Prof. Dr. Milton de Azevedo Campos, que iniciou a orientação desta tese;
- Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, através de seus professores e do Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE);
- Ao Departamento de Cartografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, pela concessão de afastamento integral durante o período de março/1994 a fevereiro/1997 e parcial de março/1997 a fevereiro/1998;
- Ao IBGE, pela colaboração com o fornecimento dos dados das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC);
- À Profa. Yola Georgiadiou, que forneceu uma cópia do programa VERTical DElay, versão 5.0 (VERDE 5.0), com o qual se testou o programa desenvolvido nesta pesquisa;
- À FAPESP, que, dentro do programa Jovem Pesquisadores em Centros Emergentes, destinou recursos financeiros, para a aquisição de um receptor GPS Ashtech ZXII e Reliance, software GPS, e compilador Lahey

FORTTRAN 95, no projeto de pesquisa intitulado “Apoio à Geodésia na Região de Presidente Prudente e Rede GPS Global” (processo 1995/08775-1), submetido pelo Prof. Dr. João Francisco Galera Monico, os quais foram utilizados nesta pesquisa;

- Ao programa CAPES/PICD, pela concessão de bolsa durante o período de afastamento;
- Ao Departamento de Recursos Naturais do Canadá (NRCan), pela cópia do software GPSPACE e sua documentação;
- Aos alunos do Curso de Engenharia Cartográfica, que auxiliaram na coleta de dados GPS, e, em especial, aos alunos Vinícius Canholi Maldonado e Marcelo Tomio Matsuoka, por auxiliarem no processamento;
- À empresa SANTIAGO & CINTRA, pelo empréstimo do *hardlock* do software GPSurvey, para processamento com a combinação livre da ionosfera e *wide lane*, em especial na pessoa do Eng. Celso Gomes; e
- À minha esposa e filhas pelo apoio, incentivo e compreensão nas ausências durante muitos finais de semanas e feriados.

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese a minha querida esposa Izabel e minhas filhas Ana Paula, Maria Luiza e Vitoria Cristina, homenageando-as com a seguinte crônica:

Uma tese é uma tese¹

Autor: Mário Prata

Sabe tese, de faculdade? Aquela que defendem? Com unhas e dentes? É dessa tese que eu estou falando. Você deve conhecer pelo menos uma pessoa que já defendeu uma tese. Ou esteja defendendo. Sim, uma tese é defendida. Ela é feita para ser atacada pela banca, que são aquelas pessoas que gostam de botar banca.

As teses são todas maravilhosas. Em tese. Você acompanha uma pessoa meses, anos, séculos, defendendo uma tese. Palpitantes assuntos. Tem tese que não acaba nunca, que acompanha o elemento para a velhice. Tem até teses pós-morte.

O mais interessante na tese é que, quando nos contam, são maravilhosas, intrigantes. A gente fica curiosa, acompanha o sofrimento do autor, anos a fio. Aí ele publica, te dá uma cópia e é sempre - sempre - uma decepção. Em tese. Impossível ler uma tese de cabo a rabo.

São chatíssimas. É uma pena que as teses sejam escritas apenas para o julgamento da banca circunspecta, sisuda e compenetrada em si mesma. E nós?

Sim, porque os assuntos, já disse, são maravilhosos, cativantes, as pessoas são inteligentíssimas. Temas do arco-da-velha. Mas toda tese fica no rodapé da história. Pra que tanto sic e tanto apud? Sic me lembra o Pasquim e apud não parece candidato do PFL para vereador? Apud Neto.

Escrever uma tese é quase um voto de pobreza que a pessoa se auto decreta. O mundo pára, o dinheiro entra apertado, os filhos são abandonados, o marido que se vire. Estou acabando a tese. Essa frase significa que a pessoa vai sair do mundo. Não por alguns dias, mas anos. Tem gente que nunca mais volta.

E, depois de terminada a tese, tem a revisão da tese, depois tem a defesa da tese. E, depois da defesa, tem a publicação. E, é claro, intelectual que se preze, logo em seguida embarca noutra tese. São os profissionais, em tese. O pior é quando convidam a gente para assistir à defesa. Meu Deus, que sono. Não em tese, na prática mesmo.

Orientados e orientandos (que nomes atuais!) são unânimes em afirmar que toda tese tem de ser - tem de ser! - daquele jeito. É pra não entender, mesmo. Tem de ser formatada assim. Que na Sorbonne é assim, que em Coimbra também. Na Sorbonne, desde 1257. Em Coimbra, mais moderna, desde 1290.

¹ O Estado de São Paulo, 7 de outubro de 1998.

Em tese (e na prática) são 700 anos de muita tese e pouca prática.

Acho que, nas teses, tinha de ter uma norma em que, além da tese, o elemento teria de fazer também uma tesão (tese grande). Ou seja, uma versão para nós, pobres teóricos ignorantes que não votamos no Apud Neto.

Ou seja, o elemento (ou a elementa) passa a vida a estudar um assunto que nos interessa e nada. Pra quê? Pra virar mestre, doutor? E daí? Se ele estudou tanto aquilo, acho impossível que ele não queira que a gente saiba a que conclusões chegou. Mas jamais saberemos onde fica o bicho da goiaba quando não é tempo de goiaba. No bolso do Apud Neto?

Tem gente que vai para os Estados Unidos, para a Europa, para terminar a tese. Vão lá nas fontes. Descobrem maravilhas. E a gente não fica sabendo de nada. Só aqueles sisudos da banca. E o cara dá logo um dez com louvor. Louvor para quem? Que exaltação, que encômio é isso?

E tem mais: as bolsas para os que defendem as teses são uma pobreza.

Tem viagens, compra de livros caros, horas na Internet da vida, separações, pensão para os filhos que a mulher levou embora. É, defender uma tese é mesmo um voto de pobreza, já diria São Francisco de Assis. Em tese.

Tenho um casal de amigos que há uns dez anos prepara suas teses. Cada um, uma. Dia desses a filha, de 10 anos, no café da manhã, ameaçou:

- Não vou mais estudar! Não vou mais na escola.

Os dois pararam - momentaneamente - de pensar nas teses.

- O quê? Pirou?

- Quero estudar mais, não. Olha vocês dois. Não fazem mais nada na vida. É só a tese, a tese, a tese. Não pode comprar bicicleta por causa da tese. A gente não pode ir para a praia por causa da tese. Tudo é pra quando acabar a tese. Até trocar o pano do sofá. Se eu estudar vou acabar numa tese. Quero estudar mais, não. Não me deixam nem mexer mais no computador. Vocês acham mesmo que eu vou deletar a tese de vocês?

Pensando bem, até que não é uma má idéia!

Quando é que alguém vai ter a prática idéia de escrever uma tese sobre a tese? Ou uma outra sobre a vida nos rodapés da história?

Acho que seria uma tesão.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO	01
1.1 Considerações iniciais.....	01
1.2 Objetivo.....	08
1.3 Conteúdo do Trabalho.....	08
2 IONOSFERA	10
2.1 Introdução.....	10
2.2 Estrutura da Ionosfera.....	12
2.3 Impacto na Propagação.....	16
2.4 Causas das Variações do Conteúdo Total de Elétrons.....	28
2.4.1 Variações temporais.....	28
2.4.2 Influência da Variação da Radiação Solar.....	30
2.4.3 Efeitos da Latitude, Longitude e do Campo Magnético da Terra.....	31
2.4.4 Outras Condições Anômalas.....	32
3 AJUSTAMENTO PELO MÉTODOS DOS MÍNIMOS QUADRADOS E CONTROLE DE QUALIDADE	35
3.1 Introdução.....	35
3.2 Método dos Mínimos Quadrados.....	39
3.3 Ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados.....	41
3.4 Método Paramétrico com Injunção.....	44
3.4.1 Parâmetros Ajustados.....	44

3.4.2 Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados.....	49
3.5 Controle de Qualidade.....	50
3.5.1 Teste Estatístico para Detecção de Erro.....	51
3.5.2 Teste Estatístico para Identificação de Observações com Erro Grosseiro.....	53
3.5.3 Adaptação.....	56
3.5.4 Teste e Seleção de Parâmetros.....	57
3.5.4.1 Teste de Significância do Modelo.....	57
3.5.4.2 Controle das Correlações dos Parâmetros.....	58
3.5.4.3 Critérios para Otimização do Modelo.....	59
4 OBSERVÁVEIS GPS E SUAS COMBINAÇÕES LINEARES.....	62
4.1 Sinais Emitidos pelos Satélites GPS.....	62
4.2 Observáveis GPS.....	64
4.2.1 Pseudodistância.....	65
4.2.2 Fase de Batimento da Onda Portadora.....	68
4.3 Combinação Linear das Observáveis.....	70
4.3.1 Combinação Linear Entre Observáveis do Mesmo Tipo.....	71
4.3.2 Combinação Linear Entre Observáveis de Diferentes Tipos.....	79
4.3.3 Equação de Simples Diferença	82
4.3.4 Equação de Dupla Diferença.....	84
4.3.5 Equação de Tripla Diferença.....	86
4.4 Matriz Variância-Covariância das Observáveis.....	87
5 TÉCNICAS DE CORREÇÃO DOS EFEITOS DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA, PARA POSICIONAMENTO COM RECEPTORES DE UMA FREQUÊNCIA.....	93
5.1 Introdução.....	93
5.2 Modelo Broadcast.....	94
5.3 Cálculo da Correção Ionosférica, a partir da Portadora L_1 , Coletada com Receptores GPS de uma Frequência.....	99
5.3.1 Modelo da lâmina Ionosférica.....	101
5.3.2 Modelo Diário com Função Co-seno.....	102

5.3.3 Modelo do Ponto Ionosférico.....	102
5.3.4 Outros Modelos.....	103
5.4 Cálculo da Correção Ionosférica, a partir de Medidas Feitas com Receptores GPS de dupla Frequência.....	104
5.4.1 Correção Ionosférica, a partir das Medidas da Pseudodistância.....	105
5.4.2 Correção Ionosférica, a partir das Medidas da Fase da Portadora.....	107
5.4.3 Modelo para Calcular a Correção da Refração Ionosférica.....	108
6 MODELO IONOSFÉRICO.....	113
6.1 Modelo Ionosférico para Pseudodistância.....	113
6.4 Modelo Ionosférico para Pseudodistância Filtrada pela Fase da Portadora.....	119
6.3 Modelo Ionosférico para Fase da Portadora.....	120
6.4 Análise dos Parâmetros do Modelo.....	122
7 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DO MODELO.....	137
7.1 Experimentos.....	137
7.2 Posicionamento por Ponto.....	138
7.2.1 Estratégia de Processamento.....	139
7.2.2 Resultados e Análise.....	140
7.2.3 Atraso Ionosférico Vertical.....	150
7.3 Posicionamento Relativo.....	153
7.3.1 Posicionamento Relativo – Linhas de Base.....	154
8 COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	161
8.1 Comentários Finais	161
8.2 Conclusões.....	162
8.3 Recomendações.....	164
ANEXOS.....	166
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Efeito do atraso de propagação, devido à ionosfera, sobre as distâncias medidas com observações de uma frequência, e erros residuais, para observações de dupla frequência.....	25
Tabela 2.2 – Máximo efeito sistemático vertical, devido à ionosfera.....	26
Tabela 4.1 – Combinação linear das fases das portadoras.....	78
Tabela 4.2 – Combinação linear das pseudodistâncias.....	78
Tabela 5.1 – Relação entre as unidades de medida do efeito de 1ª ordem e o TEC.....	98
Tabela 6.1 – Estações utilizadas na estimativa dos parâmetros	125
Tabela 7.1 – Estações utilizadas na estimativa dos parâmetros – Posicionamento por ponto.....	140
Tabela 7.2 – Resumo dos valores obtidos no posicionamento por ponto.....	146
Tabela 7.3 – Relação das bases, sessão (tempo GPS), dia do ano e efemérides precisas e região.....	156
Tabela 7.4 – Estações utilizadas na estimativa dos parâmetros – Posicionamento relativo.....	157

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estações da RBMC.....	06
Figura 2.1 – Representação esquemática da atmosfera terrestre em condições ideais.....	11
Figura 2.2 – Representação esquemática da ionosfera.....	13
Figura 2.3 – Geometria para o atraso do caminho ionosférico.....	24
Figura 2.4 – Índice de refatividade na troposfera e ionosfera.....	26
Figura 3.1 – Relação entre as fases do ajustamento.....	42
Figura 4.1 – Sinais emitidos pelos satélites GPS.....	62
Figura 4.2 – Simples diferença entre receptores.....	83
Figura 4.3 – Dupla diferença entre receptores e satélites.....	85
Figura 5.1 – Representação da ionosfera, a partir das mensagens transmitidas	95
Figura 6.1 – Desvio padrão das pseudodistâncias.....	119
Figura 6.2 – Coeficientes da série – Pseudodistância.....	128
Figura 6.3 – Erro sistemático em L_1 , para os receptores – Pseudodistância.....	130
Figura 6.4 – Erro sistemático em L_1 , para os satélites – Pseudodistância.....	131
Figura 7.1 – Discrepâncias entre as coordenadas e resultante - Posicionamento por ponto – Estação UEPP.....	142
Figura 7.2 – Erro médio quadrático das coordenadas estimadas - Posicionamento por Ponto – Estação UEPP.....	144
Figura 7.3 – Desvio padrão das coordenadas estimadas – Posicionamento por ponto – Estação UEPP.....	145
Figura 7.4 – Discrepâncias em altitudes geométricas – Posicionamento por ponto – Estação UEPP.....	147
Figura 7.5 – Posicionamento por ponto – época por época – Estação UEPP (001/98).....	148
Figura 7.6 – Posicionamento por ponto – época por época – Estação UEPP (274/98).....	149
Figura 7.7 – Atraso ionosférico vertical – Estação UEPP (001/98).....	151
Figura 7.8 – Atraso ionosférico vertical – Estação UEPP (274/98).....	151
Figura 7.9 – Atraso ionosférico vertical estimado – Estação UEPP (001/98).....	152
Figura 7.10 – Atraso ionosférico vertical calculado – Estação UEPP (274/98)...	152

Figura 7.11 – Linhas de bases.....	155
Figura 7.12 – Distribuição geográfica das bases processadas com a Estação UEPP.....	157
Figura 7.13 – Discrepâncias entre as coordenadas das linhas de bases.....	158
Figura 7.14 – Precisão das linhas bases.....	159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGRS	- Active GPS Reference System
AS	- Anti Spoofing
BRASION	- BRASil-IONosfera
CODE	- Centre for Orbit Determination in Europe
CRRAE	- Centro de Rádio-Astronomia e Aplicações Espaciais
DGPS	- Differential GPS – GPS Diferencial
DLR	- Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
DoD	- Departament of Defense - Departamento de Defesa
ESOC	- European Space Operations Center
EUA	- Estados Unidos da América
FCT	- Faculdade de Ciências e Tecnologia
FUNDACTE	- Fundação de Ciências e Tecnologia
GDOP	- Geometric Dilution of Precision - diluição da precisão geométrica
GLONASS	- GLObal Navigation Satellite System
GPS	- Global Positioning System
GRINGO	- GPS Rinex Generator
GSD	- Geodetic Survey Division
HF	- Frequência alta
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	- International GPS Service
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
IONEX	- IONosphere map Exchange
JPL	- Jet Propulsion Laboratory
LF	- Frequência baixa
MF	- Frequência média
MMQ	- Métodos dos Mínimos Quadrados
MVC	- Matriz variância-covariância

NAPA	- National Academy of Public Administration
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
NRC	- National Research Council
NRCan	- Natural Resources Canada
NNR-NUVEL-1A	- No Net Rotation – Northern University Velocity Model-1A
PRN	- Pseudo random noise
RBMC	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	- Receiver Independent EXchange
RMS	- Erro médio quadrático
ROEN	- Rádio-Observatório Espacial do Nordeste
AS	- Selective Availability - disponibilidade seletiva
SID	- Sudden Ionospheric Disturbance
SIRGAS	- Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SGB	- Sistema Geodésico Brasileiro
TEC	- Total Electron Content - conteúdo total de elétrons
TECU	- Unidade de TEC
TID	- Travelling Ionospheric Disturbance
UNESP	- Universidade Estadual Paulista
UNICAMP	- Universidade de Campinas
USP	- Universidade de São Paulo
UNB	- University of New Brunswick
VHF	- Frequência muito alta
VLf	- Frequência muito baixa
VTEC	- Vertical TEC
WADGPS	- Wide Area DGPS

RESUMO

A maior fonte de erro no posicionamento e navegação com GPS, na ausência da disponibilidade seletiva (SA), é devida à refração ionosférica. Seu efeito causa um atraso no código e avanço na fase, de uma mesma quantidade. A magnitude desse erro é afetada pelo movimento diurno do sol, estação do ano, ciclo solar, localização geográfica do receptor e campo magnético da Terra. Como é bem conhecido, o efeito sistemático provocado pela ionosfera é o principal fator limitante no posicionamento de precisão, quando se utilizam receptores de uma frequência, quer seja no posicionamento por ponto ou no posicionamento relativo de linhas-base médias e longas. Um modelo representado pela série do tipo de Fourier foi implementado e os parâmetros estimados, a partir de dados coletados pelas estações ativas da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Satélites GPS). Os dados de entrada do modelo podem ser as observáveis pseudodistâncias, pseudodistâncias filtradas pelas fases das portadoras ou fase das portadoras, coletadas nas portadoras L_1 e L_2 . Controle de qualidade baseado no teste estatístico Qui-quadrado (χ^2) foi implementado para a análise da qualidade do ajustamento, bem como o teste de significância dos parâmetros, com o objetivo de validar os coeficientes da série. As observáveis pseudodistâncias filtradas pelas fases das portadoras proporcionaram parâmetros com melhor precisão. Experimentos foram realizados no Brasil, usando dados coletados com receptores de dupla frequência. A fim de validar o modelo, valores estimados para as coordenadas de algumas estações de referências foram comparados com os

considerados verdadeiros. Para o posicionamento por ponto, foram consideradas como valores verdadeiros as coordenadas conhecidas da estação. Já no relativo, consideraram-se as coordenadas obtidas, a partir do processamento da combinação linear livre do efeito da ionosfera. As discrepâncias em relação aos valores considerados verdadeiros indicaram uma redução do erro, em média, da ordem de 80,7% e 41,7%, respectivamente, para o posicionamento por ponto e relativo de linhas de base entre 10 km e 215 km. Estes resultados indicam que mais pesquisas devem ser realizadas, a fim de prover suporte aos usuários de receptores GPS de uma frequência, necessitando de realizar posicionamento relativo. Porém, no posicionamento por ponto, os resultados proporcionaram discrepâncias da ordem de 1 (um) metro para as coordenadas cartesianas, o que mostra a potencialidade do modelo.

ABSTRACT

The largest error source in the positioning and navigation with GPS, in the absence of the selective availability (SA), is due to the ionospheric refraction. Its effects cause code delay and phase advance, of the same amount. The magnitude of this error is affected with time of day, season, solar cycle, geographical location of the receiver and magnetic field of the Earth. As it is well known, the ionosphere is the main drawback for high accuracy positioning when using single frequency receivers either for point positioning or relative positioning of medium and long baselines. The effect of the ionosphere is investigated in the determination of point positioning and relative positioning using single frequency data. A model represented by a Fourier series type was implemented and the parameter estimated from data collected by the active stations of RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS satellites). The model data input can be the pseudo range, pseudo range filtered by carrier phase or carrier phase observables, collected by both carriers, L1 and L2. Quality control based on the Chi-square (χ^2) statistical test was implemented for the analysis the quality of the adjustment, as well as the parameter significance test, with the objective to validate the estimated parameters of the series. The observables pseudo range filtered by carrier phase provided parameters with better precision. Experiments were carried out in Brazil, using data collected with dual frequencies receivers. In order to validate the model, the estimated values for coordinates station were compared with "ground truth". For point positioning the known coordinates of the station were considered as "ground truth". In the relative

positioning the coordinates obtained by processing the ionospheric free combination were the “ground truth”. The discrepancies – “ground truth” minus estimated value - indicated a reduction better than 80,7% and 41,7% respectively, for the point positioning and relative positioning of baselines ranging from 10 km to 215 km. These results give an indication that more research has to be carried in order to provide support to the single frequency GPS users, who need to realize relative positioning. However, in the point positioning, the results provided discrepancies better than 1 m for the cartesian coordinates, indicating the potentiality of the model.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

As principais fontes de erros sistemáticos que afetam o posicionamento com GPS (*Global Positioning System*) estão associadas ao satélite (órbita, relógio, relatividade, etc.), a propagação do sinal (refração troposférica e ionosférica, interrupção do sinal, multicaminho), ao receptor/antena (relógio, canais, centro de fase da antena) e à estação (coordenadas, marés terrestres e oceânicas, movimento do pólo, etc.) (Monico, 1995). Parte desses erros podem ser modelados ou reduzidos, se técnicas adequadas de rastreamento e processamento forem adotadas.

Na ausência da limitação imposta aos usuários civis pelo Departamento de Defesa (DoD) dos Estados Unidos, através da adoção da disponibilidade seletiva - SA (*Selective Availability*), a ionosfera é a maior fonte de erro no posicionamento com GPS. A limitação em se obter a exatidão capaz de ser proporcionada pelo GPS no modo pontual é consequência da SA, ativada em 04 de julho de 1991. Consiste na manipulação das mensagens de navegação e da frequência dos relógios dos satélites. Afeta diretamente o posicionamento por ponto, ao passo que, nas técnicas de posicionamento relativo e diferencial, esta degradação é praticamente eliminada, haja vista não depender da geometria do satélite. Desde 1996, discute-se a eliminação da SA dentro de um período de 4 a 10 anos, o que vem de encontro aos desejos dos usuários civis. Uma vez que o sistema russo GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*) opera sem as desvantagens do SA, e não tem o código preciso criptografado, torna-se um rival em potencial do GPS (Monico, 1998).

O erro associado à refração ionosférica, que depende de diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e atividade geomagnética, é difícil de ser corrigido. Por exemplo, durante a atividade solar máxima e para satélites próximos ao horizonte, ele pode ser maior que 100 m (Newby e Langley, 1992), devido à redução na velocidade de grupo das frequências emitidas pelos satélites GPS.

Os receptores GPS de dupla frequência permitem efetuar correções do efeito da refração ionosférica, devido ao fato da refração ser dependente da frequência do sinal. Esta estratégia permite obter resultados que são praticamente isentos desses efeitos, desde que realizada em épocas de atividade solar mínima. Entretanto tais receptores são equipamentos caros, fazendo com que os de uma frequência, a maioria de uso civil, sejam amplamente empregados para determinação de linha base, mesmo em condições não totalmente adequadas.

A desvantagem da utilização dos receptores GPS de uma frequência reside no fato de que os resultados do levantamento, para bases médias e longas, são afetados pelo efeito sistemático, devido à ionosfera. O mesmo se pode dizer do posicionamento por ponto. Porém, para bases curtas, com distâncias menores do que 10 km, a posição relativa pode ser suficientemente acurada (Wells et al., 1986).

As mensagens de navegação transmitidas pelos satélites do sistema GPS trazem informações que permitem efetuar correções da ionosfera para receptores GPS de uma frequência, utilizando o modelo de Klobuchar (Klobuchar, 1987). Porém vários estudos realizados mostraram que o modelo de Klobuchar pode remover apenas algo em torno de 50% do efeito total (Newby e Langley, 1992). Desta maneira, é necessário dispor de uma estratégia mais efetiva de eliminar os

efeitos da ionosfera, a qual tem sido investigada a partir do uso de modelos regionais para a ionosfera.

Assim, uma vez estabelecido um determinado modelo, com a introdução de observações realizadas com receptores GPS de dupla frequência, se podem estimar parâmetros que descrevem o modelo.

Estudos sobre o uso do GPS, no sul do Brasil e na região equatorial, mostraram que, na América Central e na América do Sul, as medidas do GPS são, muitas vezes, afetadas por diversas condições ionosféricas (Wanninger et al., 1991 e 1992), (Campos et al., 1993). Estas conclusões foram obtidas dos resultados de duas campanhas de GPS, denominadas de BRASION'91 (BRASil-IONosfera) e BRASION'92.

Algumas técnicas e modelos têm sido desenvolvidos, para estimar o efeito sistemático, devido à ionosfera, já que os coeficientes fornecidos nas efemérides de navegação para o modelo de Klobuchar não são adequados, para modelar flutuações diárias da ionosfera e outras anomalias (Newby et al., 1990). A determinação deste efeito tem sido feita com observações GPS coletadas com receptores de simples e dupla frequência. A solução resultante dos dados de receptores de uma frequência é limitada, principalmente pela baixa acuracidade das medidas das pseudodistâncias (Leick, 1995). A principal técnica para estimar o efeito sistemático devido à ionosfera é baseada em dados obtidos com receptores de dupla frequência, proporcionando estimativas mais exatas do erro sistemático. Nesta direção, pode-se citar o trabalho desenvolvido por Georgiadiou (1994), no qual se estimam os coeficientes de um modelo regional da ionosfera com dados GPS de um receptor de dupla frequência do sistema ativo de referência da Holanda.

Lanyi et Roth (1988), Coco et al. (1991), também utilizando uma estação GPS, estimam o conteúdo total de elétrons (TEC). Sardon et al. (1994) utilizam diversas estações GPS para este fim. Vale ressaltar que o modelo de Georgiadiou estima o efeito sistemático na portadora L_1 , provocado pela refração da ionosfera, enquanto os demais estimam o TEC da ionosfera.

A rede GPS do IGS (*International GPS Service*) oferece oportunidade única, para extrair informações sobre a ionosfera. Diversos centros na Europa produzem mapas do TEC, dentre os quais se pode citar o *Centre for Orbit Determination in Europe* (CODE), *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt* (DLR) e *European Space Operations Center* (ESOC). A *University of New Brunswick* (UNB) e o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) também têm produzido mapas. Visando a uma produção padronizada de mapas da ionosfera, Schaer et al. (1998) desenvolveram um formato chamado de IONEX (*IONosphere map EXchange*), que foi aprovado pelo IGS (Schaer, 1998). Um projeto em andamento no IGS prevê o monitoramento da ionosfera, no mínimo, para próximo período de máxima atividade, prevista para 2000-2001, visando a estudar, em particular, o impacto da ionosfera em seus produtos. O desenvolvimento de um modelo da ionosfera tem sido a sua meta, bem como a provisão de mapa combinado da ionosfera. Neste caso, arquivos no formato IONEX, produzidos por centros individuais de análise do IGS, serão enviados para o centro global de dados do IGS, onde será produzido o mapa da ionosfera, a partir dos mapas individuais produzidos pelos diversos centros (Schaer, 1998). O centro individual de análise CODE tem produzido, de forma sistemática, o mapa global da

ionosfera¹ e estimado os erros sistemáticos devidos aos satélites e receptores, utilizando-se dos dados da rede do IGS. O DLR também tem gerado esses produtos², porém em escala regional, abrangendo somente a Europa, com dados das estações européias, a maioria delas pertencentes ao IGS. Já o JPL, além do mapa regional para os Estados Unidos³, produz mapa global da ionosfera⁴.

Atualmente, o Brasil dispõe de dados para a realização de estudos desta natureza, uma vez que a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, órgão gestor do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), estabeleceu a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Sistema de Posicionamento Global-GPS, que iniciou com 9 (nove) estações espalhadas pelo Brasil, coletando dados continuamente (FORTES, 1997). Atualmente, conta com 12 (doze) estações⁵. Das doze estações, duas delas, Brasília e Fortaleza, fazem parte da rede IGS. Na estação de Fortaleza (Euzébio), Ceará, subvencionam a obtenção de dados, a partir do Rádio Observatório Espacial do Nordeste (ROEN), a saber, o CRAAE (Convênio Mackenzie, INPE, USP e UNICAMP), o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) em particular e o próprio ROEN. As estações RBMC têm como um dos objetivos principais, servir de base para o uso de posicionamento relativo e operam com receptores GPS de dupla frequência.

As estações da RBMC, conforme ilustrado na figura 1, estão localizadas em Bom Jesus da Lapa/BA (BOMJ), Brasília/DF (BRAZ), Cuiabá/MT (CUIB), Curitiba/PR (PARA), Fortaleza/CE (FORT), Imperatriz/MA (IMPZ), Manaus/AM

¹ Global Ionosphere Maps (GIMs) produced by CODE: <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>, 10/11/99.

² Ionospheric maps and GPS satellite and receivers biases: <http://www.nz.dlr.de/gps/gps-ion.html>, 10/11/99.

³ U.S. regional maps of ionospheric TEC: <http://iono.jpl.nasa.gov/latest.html>, 14/12/99.

⁴ Global maps of ionospheric TEC: <http://iono.jpl.nasa.gov/gim.html>, 14/12/99.

⁵ Pereira, K.D.. Comunicação pessoal, via correio eletrônico, em 09 de novembro de 1999.

(MANA), Porto Alegre/RS (PORT), Presidente Prudente/SP (UEPP), Recife/PE (RECF), Salvador/BA (SALV) e Viçosa/MG (VICO).

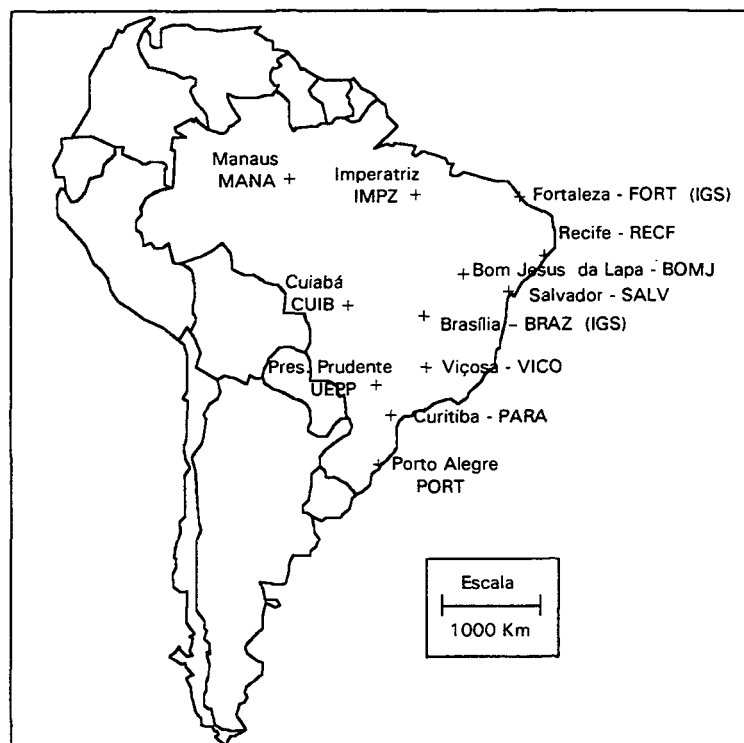


Figura 1.1 – Estações da RBMC

Utilizando-se dos dados das estações da RBMC-GPS, torna-se possível calcular os coeficientes de um modelo regional, os quais podem ser utilizados em conjunto com receptores GPS de uma frequência, contemplando a área abrangida pela RBMC. No Brasil, ainda não foi realizado nenhum estudo neste sentido, e vale ressaltar que a maioria dos receptores utilizados pela comunidade usuária é de uma portadora.

A pesquisa proposta visará à definição de um modelo regional para a ionosfera, permitindo, assim, a correção de parte do erro sistemático da ionosfera em observações coletadas com receptores GPS de uma frequência.

A FCT/UNESP - Campus de Presidente Prudente, Universidade onde trabalha o autor deste projeto, possui dois rastreadores GPS Trimble 4000-SL, um receptor Ashtech Reliance, todos de uma frequência, os quais são constantemente utilizados em trabalhos de docência, pesquisa e prestação de serviços à comunidade, bem como um receptor GPS Ashtech ZXII de dupla frequência. Ainda são utilizados com certa regularidade os receptores Trimble 4600-LS, também de uma frequência, pertencentes à Fundação de Ciências e Tecnologia (FUNDACTE). Tal fato, em si, justifica a investigação de um modelo adequado para correção do efeito sistemático da ionosfera, objetivando obter melhores resultados nos posicionamentos realizados com receptores GPS de uma única frequência. Além disto, os coeficientes estimados no modelo a ser definido poderão ser utilizados por toda comunidade cartográfica que necessite de melhorar o posicionamento realizado com receptor de uma frequência.

O *Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy* (IESSG) da Universidade de Nottingham desenvolveu um programa, GPS Rinex Generator (GRINGO), que registra, no formato RINEX (Receiver Independent Exchange format), as pseudodistâncias coletadas com receptores de navegação Garmin de 12 canais (HILL et al., 1999). Isto possibilita a correção dessas observáveis do efeito da ionosfera e o pós-processamento dos dados, ainda que seja no modo pontual, relativo ou GPS diferencial (DGPS).

1.2 Objetivo

O principal objetivo desta pesquisa consiste na definição de um modelo matemático, que permita corrigir parte dos efeitos sistemáticos, devido à ionosfera, em escala regional, de forma que os resultados advindos da utilização de receptores GPS de frequência simples, no âmbito da RBMC, possam ser melhorados.

Para atingir o objetivo principal desta pesquisa, deve-se:

- Apresentar um estudo sobre o efeito ou impacto da ionosfera nas observações com receptores GPS de uma frequência;
- Verificar a performance do modelo na região de Presidente Prudente, a partir dos posicionamentos por ponto e relativo, onde as observações GPS da portadora L_1 serão corrigidas do efeito sistemático da ionosfera.

Além disto, este trabalho pretende contribuir como subsídio à bibliografia nacional.

1.3 Conteúdo do Trabalho

O conteúdo desta pesquisa está dividido em oito capítulos, de forma a alcançar os objetivos propostos. No segundo capítulo, será apresentada a definição da atmosfera, sua divisão para efeito de propagação de sinais GPS, a estrutura da

ionosfera e seu impacto na propagação de sinais, bem como as causas das variações do conteúdo total de elétrons. No capítulo terceiro, apresenta-se o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados e controle de qualidade. É dada ênfase ao ajustamento pelo método paramétrico com injunção, e, no que concerne ao controle de qualidade, serão tratados os testes estatísticos para análise da qualidade do ajustamento, para identificação de observações com erro grosseiro e análise da significância dos parâmetros envolvidos no modelo. No capítulo quarto, descreve-se sobre os sinais transmitidos pelos satélites GPS, sobre as observáveis obtidas, a partir dos sinais, e a combinação linear das mesmas, com objetivo principal de apresentar a combinação linear que reduz o efeito sistemático da ionosfera, bem como a matriz variância das combinações lineares obtidas. No capítulo quinto, apresentam-se algumas técnicas e modelos, para corrigir os efeitos da ionosfera, utilizando receptores de uma e duas frequências. No capítulo sexto, apresenta-se o modelo modificado e empregado, para estimar os coeficientes que permitem calcular o efeito da ionosfera na portadora L_1 . Os resultados dos testes realizados com objetivo de verificar a performance do modelo para posicionamento por ponto e relativo, utilizando os coeficientes estimados, a partir dos dados das estações da RBMC, serão apresentados no capítulo sétimo. Com base na pesquisa realizada, considerações, conclusões, recomendações serão apresentadas no capítulo oitavo.

2 IONOSFERA

2.1 Introdução

A atmosfera pode ser considerada, para a maioria dos propósitos práticos, como um conjunto de camadas de gases, esféricas e concêntricas à Terra. A estrutura da atmosfera terrestre está relacionada com diversos parâmetros (térmicos, químicos, eletromagnéticos), cujos valores, geralmente combinados, podem variar sensivelmente, em função da hora, da época do ano, da latitude, da longitude e atividade solar.

Normalmente é conveniente dividir a atmosfera, com respeito à propagação de sinais, em troposfera e ionosfera, porque as condições particulares de propagação são bem diferentes. As camadas mais baixas da atmosfera terrestre, compreendida entre a superfície da Terra até, aproximadamente, 50 km, recebem o nome de troposfera. Constituem a zona neutra da atmosfera e a propagação do sinal depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura da camada atmosférica. Neste caso, a refração independe da frequência do sinal transmitido, através dela, desde que a mesma seja abaixo de 30 GHz (Leick, 1995). A parte superior, estendendo-se, aproximadamente, entre 50 km e 1000 km, recebe o nome de ionosfera. É formada por partículas livres carregadas, ou seja, por partículas ionizadas. Nesta camada, a propagação do sinal depende da frequência.

A composição química da atmosfera e a descrição das características de suas camadas, de maneira a evidenciar particularidades da atmosfera, podem ser

encontradas na dissertação de mestrado, intitulada *Refração Atmosférica nas Medidas Doppler* (Oliveira, 1990).

Na figura 2.1, observa-se uma representação simplificada e clara, em condições ideais, da estrutura da atmosfera; incluindo a denominação usual das diferentes camadas, a variação da pressão e da temperatura com a altitude (Osório, 1992):

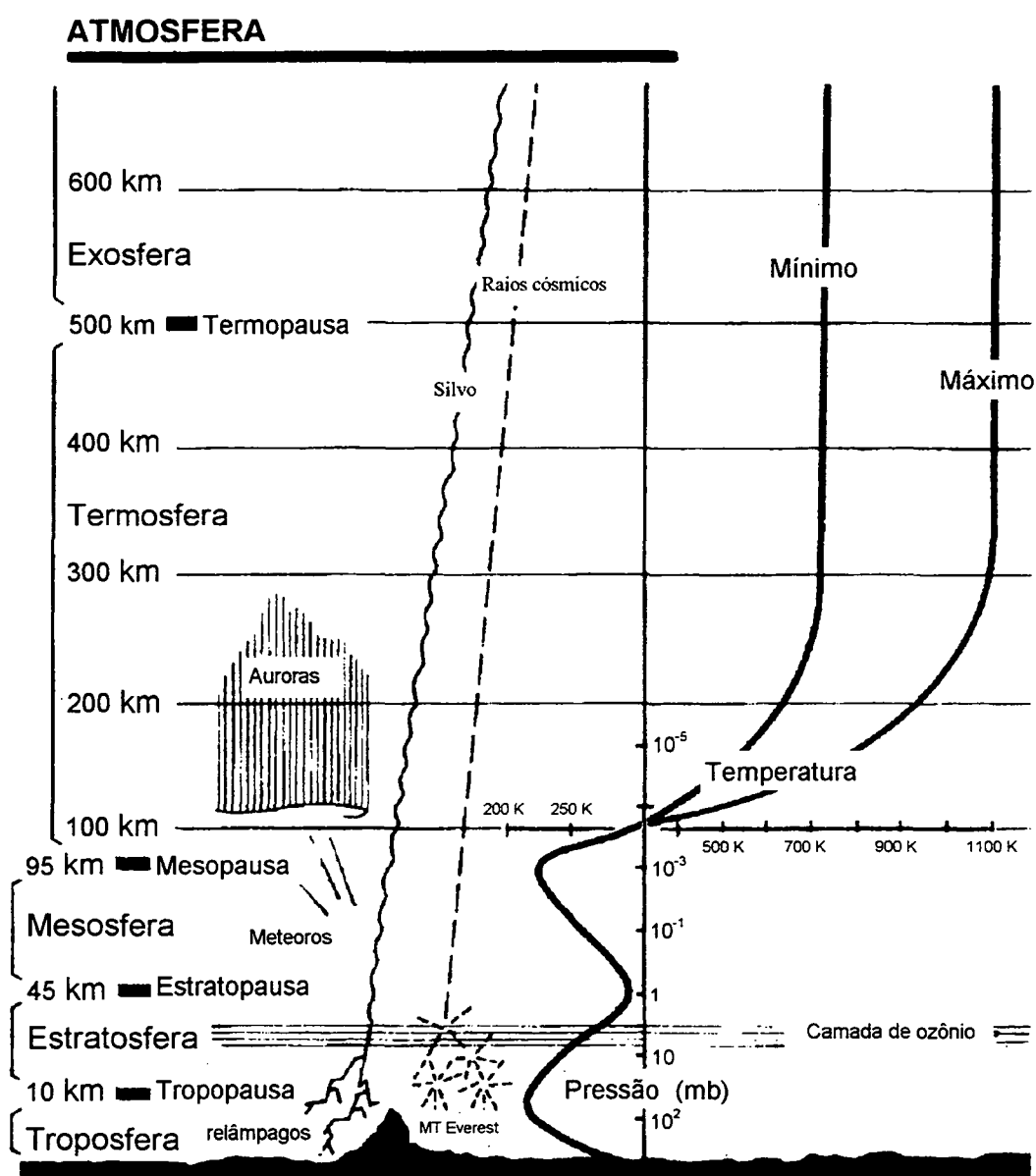


Figura 2.1 - Representação esquemática da atmosfera terrestre em condições ideais (Fonte: Osório, 1992)

Após a camada de ozônio, acima dos 50 km, surgem as camadas de partículas ionizadas, resultantes da ação da radiação solar, principalmente pela absorção dos raios ultravioleta e raio-X, pelas partículas neutras.

2.2 Estrutura da Ionosfera

A radiação solar contém suficiente energia, para as ondas eletromagnética do sol de curto comprimento de onda causarem apreciável fotoionização da atmosfera terrestre nas altas altitudes, criando, na atmosfera superior, regiões parcialmente ionizadas, conhecidas como ionosfera, que variam de, aproximadamente, 50 a 1000 km. Todavia, as partes ionizadas da atmosfera estendem-se ao espaço interplanetário e misturam-se com o vento solar e com o plasma interplanetário, com um decréscimo da densidade de elétrons. Durante o dia, diversas camadas ou regiões ionosféricas são reconhecidas. Admite-se que a ionosfera é formada de três regiões, na seqüência em que aumenta a altitude e a concentração de íons, denominadas D, E e F (figura 2.2), cujas divisões não são tão distintas. Cada região contém, muitas vezes, diversas camadas. Por exemplo, a região F, para épocas de alta ionização, durante o dia, na estação de verão, divide-se em duas ou mais regiões, designadas de F_1 e F_2 (Webster, 1993). Após a concentração máxima de elétrons, que ocorre na região F, a densidade de elétrons decresce, até fundir-se com o vento solar.

Na figura 2.2, pode-se ver a representação da distribuição das camadas, da densidade de elétrons ao longo do dia, bem como tipos de ondas que se propagam na ionosfera (Osório, 1992).

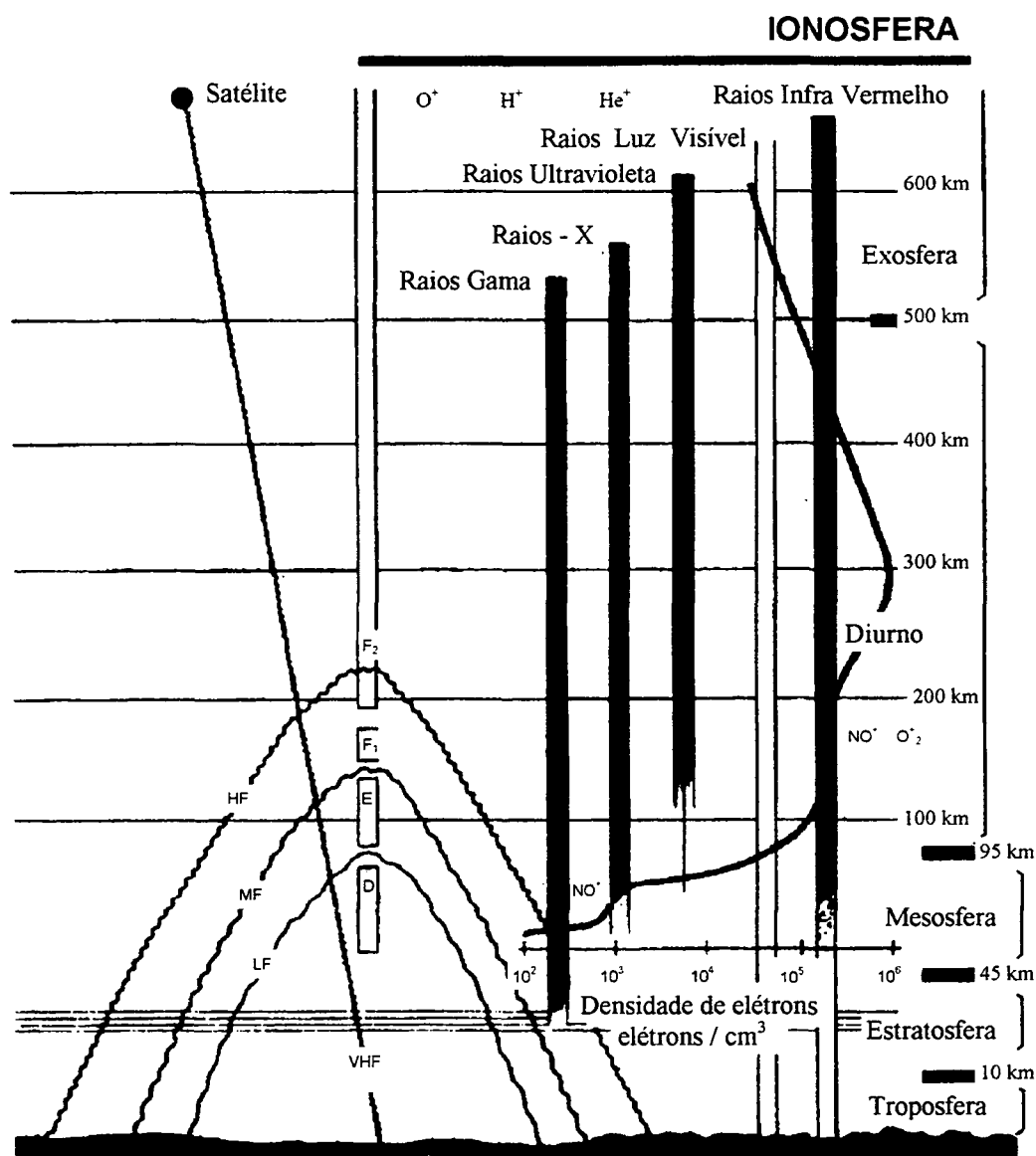


Figura 2.2 - Representação esquemática da ionosfera
(Fonte: Osório, 1992)

Na região D, região mais baixa da ionosfera, com altitude máxima de aproximadamente 85 km, a concentração máxima de elétrons ocorre próximo à altitude de 80 km e é da ordem de 10^3 elétrons/cm³ (el/cm³). Essa região desaparece durante a noite, devido à falta de ionização e recombinação dos elétrons. Ela é importante na propagação de ondas e atua com uma fonte absorvedora de energia eletromagnética das ondas de frequência média (MF), de

freqüência alta (HF) e de freqüência muito alta (VHF), refletora dos sinais de freqüência baixa (LF) e de freqüência muito baixa (VLF) (Davies, 1990). Devido à alta densidade de gás, faz com que as colisões dos elétrons sejam altas. À noite, quando a concentração de elétrons é menos acentuada, a propagação de ondas não é muito perturbada.

A região E, compreendida, aproximadamente, entre as altitudes de 85 e 140 km, apresenta uma concentração de elétrons, da ordem de 10^5 el/cm³. A densidade de elétrons é maior, quando próxima do meio dia local, com comportamento quase simétrico, ao longo do dia. Variações na densidade de elétrons ocorrem próximo das altitudes de 90-120 km ou maior, gerando uma fina camada com poucos quilômetros de espessura, designada de esporádica E, representada por E_s. Essas perturbações são produzidas por elétrons energizados, a partir da magnetosfera, meteoros, além de outros diferentes fenômenos físicos. Nas regiões próximas ao equador magnético, ocorrências diurnas da esporádica E são bem comportadas e apresentam feições regulares com pouca variação sazonal. A E_s ocorre ocasionalmente à noite, para altas latitudes, e ,durante o dia, próxima ao equador magnético. Nas médias latitudes, a ocorrência é maior durante o verão do que no inverno (Johnson, 1965). Com respeito à propagação de ondas, a esporádica E_s reflete ondas de rádio, com freqüência acima de aproximadamente 100 MHz (Davies, 1990).

A região compreendida, aproximadamente, entre as altitudes de 140 km e 200 km é designada de F₁ e apresenta uma concentração de elétrons variando de $2,5 \times 10^5$ el/cm³ a 4×10^5 el/cm³, para ocorrências de manchas solares mínimas e máximas, respectivamente. Porém, à noite, essa região desaparece (Johnson,

1965). A região F_2 é definida como sendo a região compreendida a partir de 200 km até, aproximadamente, 1000 ou 2000 km. O limite inferior é determinado pela distribuição da concentração de elétrons. A altitude de pico de concentração da densidade máxima de elétrons nesta região varia, consideravelmente, durante o ciclo de sombra solar, com a latitude e diariamente. A concentração de elétrons, nesta região, faz com que a mesma apresente uma característica difusa. Esse fenômeno é chamado de *spread F* e ocorre principalmente à noite, fazendo com que a densidade de elétrons varie, provocando uma cintilação nos sinais de rádio, estrelas ou outras fontes de rádio do outro lado da ionosfera (Johnson, 1965). Davies (1990) salienta que essas irregularidades são importantes em propagação de rádios que utilizam HF e VHF.

As diversas regiões da ionosfera são descritas pelas suas propriedades, tais como concentração de elétrons, altitudes, etc. Cada região tem sua própria frequência crítica, que representa a frequência máxima, com incidência vertical, que pode ser refletida pela região, ignorando o efeito do campo magnético da Terra (Webster, 1993). Os sinais de frequência muito alta (VHF) são capazes de atravessar todas as camadas da ionosfera. O oposto ocorre com os sinais de frequência baixa (LF), média (MF) e alta (HF), como pode ser visto na figura 2.2.

A quantidade de partículas ionizadas cresce do solo com a altitude até um valor máximo, decrescendo depois ou permanecendo constante, até o início da camada superior. Todas as camadas variam de altitude e de densidade, segundo os ciclos solares diários, anuais e periódicos (aproximadamente a cada 11 anos); mas essas variações não ocorrem sempre no mesmo sentido para as diferentes camadas (Picquenard, 1974).

As propriedades da ionosfera variam com as coordenadas geográficas ou geomagnéticas, com a hora local, a altitude, a estação do ano, o ciclo de manchas solares, as tempestades geomagnéticas e, até mesmo, com as marés e os ventos na termosfera (Osório, 1992). A posição, hora local e estação do ano modificam o ângulo que o Sol faz com o zênite do lugar de observação; e a energia recebida por uma superfície dada é proporcional ao co-seno do ângulo zenital. Contudo a influência da longitude, devida à não coincidência dos pólos geográficos ou magnéticos, é sensível somente nas camadas ionosféricas mais altas (Picquenard, 1974).

A ionosfera é um meio dispersivo. Portanto, o índice de refatividade depende da frequência do sinal que a atravessa. Os responsáveis pela variação são os elétrons da ionosfera.

O estudo da propagação dos sinais de rádio emitidos pelos satélites do sistema GPS na ionosfera é complicado, por causa da variação da condutividade do meio com a frequência.

2.3 Impacto na Propagação

Os sinais GPS, no seu caminho entre o satélite e a antena da estação de rastreio, propagam-se, através da atmosfera dinâmica, atravessando camadas de diferentes naturezas e estados variáveis. Assim sendo, sofrem diferentes tipos de influências, que podem provocar variações na direção de propagação, velocidade de propagação, na polarização e na potência do sinal (Seeber, 1993).

Esse meio de propagação compreende a troposfera e a ionosfera, com características bem diferentes. Como já visto anteriormente, a troposfera, para frequências abaixo de 30 GHz, comporta-se como um meio não dispersivo, ou seja, a refração é independente da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar. A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (Leick, 1995). O retardo é referido, também, como atraso ionosférico e aumenta o comprimento aparente do caminho percorrido pelo sinal.

Os efeitos da troposfera são, normalmente, reduzidos, por meio de técnicas de processamento ou determinado diretamente por meio de modelos. Uma vez que não é possível avaliar a pressão e a temperatura atmosférica ao longo do percurso do sinal, através da camada neutra (Osório, 1992), existem vários modelos disponíveis, que corrigem de 92% a 95% desse efeito (Wells et al. 1986). Maiores pormenores podem ser encontrados em Oliveira (1990), Munck (1991) e nos livros específicos de GPS, como, por exemplo, Leick (1995), Hofmann-Wellenhof et al. (1993) e Seeber (1993).

Ao contrário, o efeito da ionosfera, que depende da frequência, e, conseqüentemente, do índice de refração, é proporcional ao TEC, ou seja, ao número de elétrons presentes ao longo do caminho do satélite ao receptor. E o problema principal é que o TEC varia no tempo e no espaço, em função do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e direção do raio vetor do satélite (Leick, 1995).

O afastamento do índice de refração de seu valor unitário, nas diferentes camadas da ionosfera, faz com que a velocidade da fase da portadora (V_f) dada por (Hofmann-Wellenhof et al., 1993):

$$V_f = \lambda f, \quad (2.1)$$

sofra um retardo, onde λ representa o comprimento da onda e f a sua frequência.

Para um grupo de ondas, ou seja, para as medidas de código, a propagação da energia é definida com a velocidade de grupo (V_g) (Hofmann-Wellenhof et al., 1993):

$$V_g = - \frac{df}{d\lambda} \lambda^2, \quad (2.2)$$

e sofre um avanço durante a propagação do sinal.

Diferenciando-se a equação (2.1) e substituindo-a na equação (2.2), obtém-se uma expressão que relaciona a velocidade de grupo com a velocidade de fase, descrita como equação de *Rayleigh*:

$$V_g = V_f - \lambda \frac{dV_f}{d\lambda}. \quad (2.3)$$

Os correspondentes índices de refração para a velocidade de fase e de grupo são dados como:

$$n_f = \frac{v}{V_f}, \quad (2.4)$$

e

$$n_g = \frac{c}{V_g}, \quad (2.5)$$

sendo c a velocidade da luz.

E a equação modificada de *Rayleigh* relaciona ambos os índices de refração, por meio da expressão (Hofmann-Wellenhof et al., 1993):

$$n_g = n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda}, \quad (2.6)$$

ou

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df}, \quad (2.7)$$

pois, a partir da relação $c = \lambda f$, derivando λ em relação a f , ou vice versa, se tem que $\lambda / d\lambda = - f / df$.

O índice de refração da fase na ionosfera pode ser aproximado pela série (Seeber, 1993):

$$n_f = 1 + \frac{C_2}{f^2} + \frac{C_3}{f^3} + \frac{C_4}{f^4} + \dots, \quad (2.8)$$

onde os coeficientes c_2 , c_3 e c_4 dependem somente da densidade de elétrons (n_e) por m^3 , ao longo da trajetória de propagação do sinal. Considerando somente os efeitos de primeira ordem, pode-se expressar que:

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2}. \quad (2.9)$$

A partir da equação (2.7), pode-se obter o índice de refração da velocidade de grupo, onde:

$$dn_f = -2 \frac{c_2}{f^3} df. \quad (2.10)$$

Assim:

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2}. \quad (2.11)$$

Pode-se observar que o índice de refração da fase e do grupo se diferenciam somente no sinal do coeficiente c_2 . Esse coeficiente, que depende da densidade de elétrons (n_e), é dado por (Hartmann e Leitingner, 1984):

$$c_2 = -40,3 n_e. \quad (2.12)$$

Em unidades do Sistema Internacional de medida, a constante 40,3 é dada em $\text{mHz}^2(\text{el}/\text{m}^2)^{-1}$ e n_e em el/m^3 .

Assim, tem-se que:

$$n_f = 1 - \frac{40,3 n_e}{f^2}, \quad (2.13)$$

e

$$n_g = 1 + \frac{40,3 n_e}{f^2}, \quad (2.14)$$

resultando diferentes velocidades nos sinais, de modo que ocorram atraso no grupo e avanço na fase, pois a velocidade de grupo (V_g) é menor que a velocidade de fase (V_f). Consequentemente, provoca um aumento nas distâncias obtidas, a partir do código, e uma diminuição nas obtidas, a partir da fase, de uma mesma quantidade.

A distância (S) entre o satélite (s) e o receptor (r), desprezando-se os outros erros sistemáticos, é dada por:

$$S = \int_s^r n \, ds, \quad (2.15)$$

onde n representa, de forma genérica, o índice de refração da fase ou de grupo.

A diferença entre a distância medida (S) e a distância geométrica (ρ) entre o satélite e o receptor é chamada de refração ionosférica (I_r^s) e representa o erro sistemático, que, no caso da fase da portadora ($I_{r,r}^s$), é:

$$I_{fr}^s = \int_s^r \left(1 - \frac{40,3 n_e}{f^2}\right) ds - \rho, \quad (2.16)$$

ou

$$I_{fr}^s = - \frac{40,3}{f^2} \int_s^r n_e ds, \quad (2.17)$$

onde a parcela variável caracteriza a densidade de elétrons ao longo do caminho e representa o conteúdo total de elétrons (TEC), ou seja:

$$TEC = \int_s^r n_e ds. \quad (2.18)$$

Assim:

$$I_{fr}^s = - \frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (2.19)$$

De forma similar, obtém-se a refração ionosférica para os sinais modulados pelo código I_{gr}^s :

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (2.20)$$

Nas expressões (2.19) e (2.20), o TEC é dado ao longo da direção do satélite e receptor e a unidade utilizada para representá-lo é dada em elétrons, por metros quadrados (el/m²). Para quantidades do TEC na direção vertical (VTEC), a refração é calculada, a partir das seguintes equações:

$$I_{fr}^s = - \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} \text{VTEC}, \quad (2.21)$$

e

$$I_{gr}^s = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} \text{VTEC}, \quad (2.22)$$

respectivamente, para a fase e o código.

O valor de z' , que representa o ângulo zenital do caminho do sinal, em relação a um plano de altitude média (h_m), é obtido da seguinte expressão (Hofmann-Wellenhof et al., 1993):

$$\sin z' = \frac{r_m}{r_m + h_m} \sin z, \quad (2.23)$$

onde r_m é o raio médio da Terra, h_m representa a altura média da ionosfera, que varia entre 300 e 450 km, e z é a distância zenital do satélite. A figura 2.3 ilustra as quantidades envolvidas na expressão (2.23).

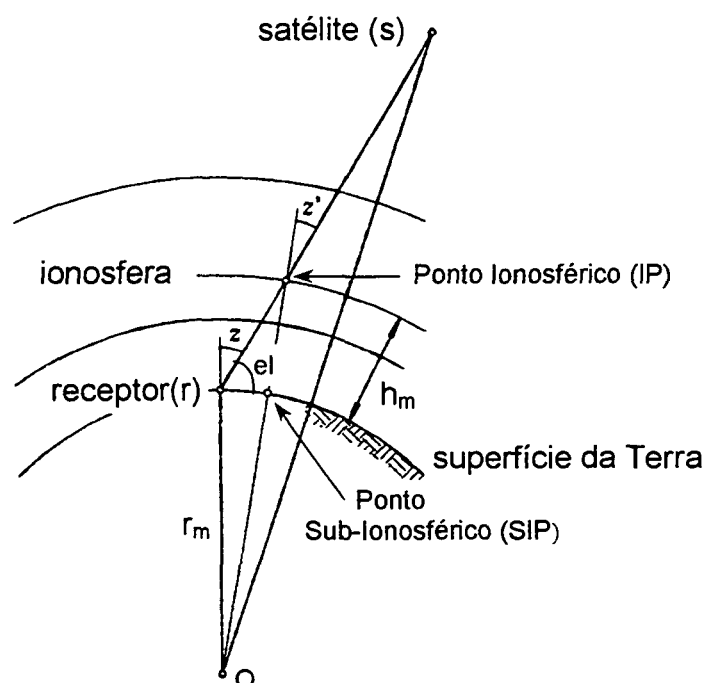


Figura 2.3 - Geometria para o atraso do caminho ionosférico
(Fonte: Hofmann-Wellenhof et al., 1993)

A distribuição espacial dos elétrons e íons é determinada, principalmente, por dois processos, denominados de *processo foto-químico*, que depende da insolação do Sol e comanda a razão da produção e de composição das partículas ionizadas, bem como de *processo de transporte*, que comanda o movimento das camadas ionizadas, criando, assim, as diferentes camadas ionizadas em diferentes alturas (Seeber, 1993).

Vários modelos têm sido desenvolvidos, para estimar a densidade de elétrons. No entanto, é difícil encontrar um que estime o TEC com precisão adequada aos levantamentos geodésicos de precisão. Por exemplo, o modelo de Klobuchar tem sido, usualmente, aplicado na correção de medidas GPS (Klobuchar, 1987). Uma melhor correção é obtida, quando o coeficiente c_2 (eq. 2.8) é estimado,

a partir de observações simultâneas dos sinais transmitidos pelos satélites GPS em duas frequências.

Da expressão (2.13) ou (2.14), nota-se que as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera, pois o índice é proporcional ao quadrado da frequência, e, conseqüentemente, o tempo de atraso ou avanço será menor. A tabela 2.1 mostra como a ionosfera afeta a propagação para diferentes frequências e indica o erro residual na vertical, quando medidas de duas frequências são disponíveis (Hieber, 1983, apud Seeber, 1993).

Tabela 2.1 - Efeito do atraso de propagação, devido à ionosfera sobre as distâncias medidas com observações de uma frequência, e erros residuais para observações de dupla frequência (Fonte: Seeber, 1993).

Uma frequência	400 MHz	1600 MHz	2000 MHz	8000 MHz
Efeito médio	50 m	3 m	2 m	0,12 m
90% < do que	250 m	15 m	10 m	0,6 m
Efeito máximo	500 m	30 m	20 m	1,2 m
Duas frequências	150/400MHz	400/2000MHz	1227/1572 MHz	2000/8000 MHz
Efeito médio	0,6 m	0,9 cm	0,3 cm	0,04 cm
90% < do que	10 m	6,6 cm	1,7 cm	0,21 cm
Efeito máximo	36 m	22 cm	4,5 cm	0,43 cm

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração (eq. 2.9 e 2.11), a correção do erro sistemático, devido à ionosfera, calculada pelas expressões (2.21) e (2.22) representa somente o efeito de primeira ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência. O erro remanescente representa poucos centímetros (Seeber, 1993). A tabela 2.2 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as

portadoras L_1 , L_2 e para a combinação linear livre da ionosfera (L_0). Para direções inclinadas, a influência aumenta (Wübbena, 1991, apud Seeber, 1993).

Tabela 2.2 – Máximo efeito sistemático vertical, devido à ionosfera (Fonte: Seeber, 1993).

Frequência	Efeito de 1ª ordem ($1 / f^2$)	Efeito de 2ª ordem ($1 / f^3$)	Efeito de 3ª ordem ($1 / f^4$)
L_1	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L_2	53,5 m	0,076 m	0,007 m
L_0	0,0 m	0,026 m	0,006 m

O valor do índice de refração da ionosfera, que depende da frequência do sinal, bem como da troposfera, pode ser visto na figura 2.4, através do índice de refratividade ($N = (n - 1) 10^6$). Na troposfera, o índice (N_t) é positivo e independente da frequência, ao contrário da ionosfera, onde o índice (N_i) é negativo e depende de frequência (Seeber, 1993).

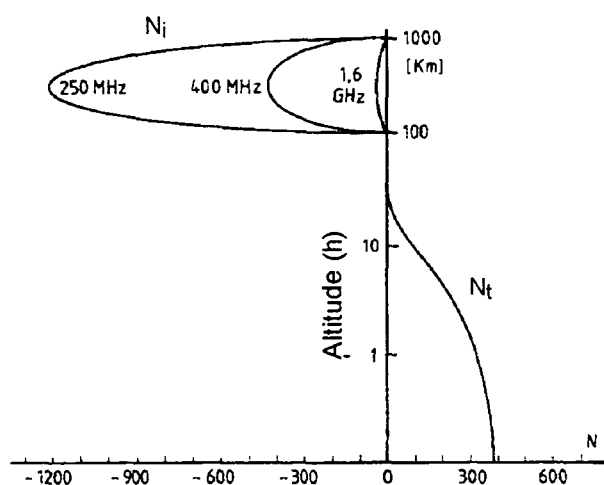


Figura 2.4 - Índice de refratividade na troposfera e ionosfera (Fonte : Seeber, 1993)

Está em discussão a introdução de uma terceira frequência nos satélites do GPS. O relatório conjunto da Academia Nacional da Administração Pública (*National Academy of Public Administration* - NAPA) e do Conselho Nacional de Pesquisa (*National Research Council* - NRC), no qual se projeta o futuro do GPS, faz recomendações de que providências devem ser tomadas, para a autorização do uso de frequência na banda L (Hatch, 1996). Esse novo sinal, não criptografado, deverá ser adicionado aos satélites do Bloco IIF, na mais breve oportunidade.

Além desse novo sinal civil (C/A) a ser modulado na portadora designada de L_5 , com frequência igual a 1176,45 MHz, a segunda geração de satélites GPS terá um sinal civil centrado na frequência L_2 . Uma melhor performance no posicionamento será conseguida pelo usuário civil com o segundo código civil em L_2 e com o terceiro em L_5 . A disponibilidade de três códigos civis tem evidentes vantagens para a correção do efeito da ionosfera, além da resolução da ambigüidade a nível centimétrico (Spilker et al., 1999).

Além dos benefícios da redução do efeito da ionosfera no posicionamento e navegação com GPS, com possibilidade de se obterem precisões centimétricas em levantamento cinemático com bases mais afastadas e WADGPS (*Wide Area Differential GPS*), uma melhor precisão na solução dos relógios do satélite e órbita será conseguida.

2.4 Causas das Variações do Conteúdo Total de Elétrons

A densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, em função do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclos de manchas solares, estação do ano, localização do usuário, é afetada por variações temporais, espaciais e anômalas.

2.4.1 Variações Temporais

As variações temporais, que compreendem as variações diurnas, sazonais e de ciclos de longos períodos, serão apresentadas de forma resumida, com o objetivo de mostrar as mudanças na concentração da densidade de elétrons na ionosfera.

As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera, que desaparecem à noite, devido à recombinação e junção dos elétrons e íons. Na região D (figura 2.2), a concentração de elétrons decresce e desaparece à noite (Seeber, 1993; Davies, 1990). À noite, todos os vestígios da camada E desaparecem, ao pôr do Sol, exceto para uma ionização residual, e aparecem imediatamente, ao nascer. A camada F_1 também desaparece à noite, enquanto que a quantidade de elétrons da camada F_2 é reduzida, alcançando o valor mais baixo na madrugada, aumentando rapidamente com o nascer do Sol. O principal fator, para que ocorra a variação diurna, é a iluminação do Sol.

Ao longo do dia, o TEC, para uma localização, depende da hora local, com densidade que alcança um máximo entre as 12:00 e 16:00 horas (Webster, 1993).

As mudanças sazonais são provocadas por variações na densidade de elétrons, que ocorrem, devido às estações do ano, principalmente pela mudança do ângulo zenital do Sol e intensidade do fluxo de ionização. A radiação que atinge a Terra e sua atmosfera é mais direta no verão do que no inverno, causando, assim, uma mais baixa razão de absorção, que faz com que ocorra um aumento na ionização (Webster, 1993). No inverno, num mesmo hemisfério, a camada F_1 desaparece durante o dia; e a camada E é reduzida. No entanto, em médias (temperadas) latitudes, há mais ocorrência da esporádica E durante o verão do que no inverno. A camada F_2 tem uma conduta contrária às demais camadas durante o dia. No período de inverno, apresenta um aumento no número de elétrons, devido às mudanças na proporção dos elementos gasosos e moléculas presentes entre as estações. Esse fenômeno, que representa uma anomalia sazonal, é mais evidente em latitudes médias e na região polar.

A variação de longo período, com ciclo de, aproximadamente, 11 anos, também designada de variação do ciclo solar, é associada à ocorrência de manchas solares, que provocam um correspondente aumento na ionização, com o aumento do número de manchas. O próximo máximo deverá ocorrer por volta do ano 2000-2001. Nas camadas mais altas, ocorre um maior aumento na densidade de elétrons.

As manchas solares são regiões mais frias e escuras, que aparecem na superfície do Sol, originadas por intensos campos magnéticos, que inibem o fluxo de energia proveniente das camadas internas e aprisionam os gases da atmosfera solar, que ficam mais quentes e brilhantes, formando regiões ativas, onde ocorrem explosões solares (INPE, 1997).

2.4.2 Influência da Variação da Radiação Solar

A variação na quantidade da emissão do raio ultravioleta emitida pelo Sol provoca um efeito no nível de ionização da atmosfera terrestre, com períodos que variam de minutos a semanas (Webster, 1993). Três tipos de fenômenos estão associados a essa variação. O primeiro deles é associado às explosões solares (*solar flares*), que são fenômenos localizados e designados de súbito distúrbio ionosférico (*Sudden Ionospheric Disturbance* - SID), provocado por um rápido aumento de energia na superfície do Sol e emitida na forma de raio-X e ultravioleta. Esse evento tem curta duração, que varia de alguns minutos a uma hora, e é associado ao o aumento de ionização durante o dia, na baixa região D, que, por sua vez, provoca uma forte atenuação nos sinais de rádio. As regiões E e F não são afetadas por esse distúrbio.

O segundo tipo de variação da radiação solar está associado aos buracos na coroa (*coronal holes*), que são as fontes das correntes do vento solar de alta velocidade, mais comuns no período de declínio da atividade solar e causam as tempestades ionosféricas. O vento solar escapa de buracos na coroa solar aquecida e forma a heliosfera. Quando ocorre esse fenômeno, as partículas que estão sendo emitidas do Sol pelo vento solar sofrem uma aceleração, aumentando, consideravelmente, sua velocidade, e, juntamente com a rotação do Sol, afetam a forma espiral em que a Terra está mergulhada.

O terceiro efeito está relacionado às manchas solares. Elas são regiões escuras, que aparecem na superfície do Sol, e podem durar alguns dias ou até

semanas. Essas manchas são rodeadas por regiões mais brilhantes, designadas de *plages*, que emitem um nível mais alto de raios ultravioleta.

2.4.3 Efeitos da Latitude, Longitude e Campo Magnético da Terra

A estrutura global da ionosfera não é homogênea. Ela muda com a latitude, devido à variação do ângulo zenital do Sol, que influencia, diretamente, no nível de radiação. Por exemplo, as regiões equatoriais são caracterizadas por um alto nível de densidade de elétrons. Já as regiões de latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas, enquanto as regiões polares não são muito previsíveis (Webster, 1993). A influência da longitude, devido à não coincidência dos pólos geográficos e magnéticos, é sensível somente nas regiões mais altas (região F₂) (Picquenard, 1974).

O campo magnético da Terra, com 99% derivado do seu interior, se comporta como o campo magnético de um dipolo, colocado no centro da Terra e inclinado de aproximadamente 11,5 graus, em relação ao eixo de rotação, e que não passa exatamente pelo seu centro (Kirchhoff, 1991). O campo magnético em torno da Terra forma as linhas de força geomagnéticas, mais potentes nos pólos do que no equador, provocando mudanças nas partículas carregadas na atmosfera, as quais giram em torno dela; e a razão depende da intensidade do campo, massa e carga das partículas. Maiores mudanças ocorrem no pólo, devido à intensidade do campo magnético ser maior. O vento solar, interagindo com o campo geomagnético, faz com que as linhas sejam comprimidas do lado da Terra voltado para o Sol e

estendidas do outro lado, provocando variações na densidade de elétrons, que também ocorrem, devido às tempestades geomagnéticas.

2.4.4 Outras Condições Anômalas

Além das irregularidades que ocorrem na região E, designadas de esporádica E (E_s), têm-se as anomalias que ocorrem nas regiões equatorial e polar. Na região equatorial, a densidade de elétrons da ionosfera é influenciada pelo alto nível de radiação solar e pelos campos magnético e elétrico da Terra. Isto faz com que os elétrons se movam ao longo das linhas de força horizontais do campo geomagnético para longe do equador. Essa anomalia é chamada de efeito fonte (*fountain effect*) (Webster, 1993). Tem origem na região F, com latitude geomagnética entre 10 e 20 graus, causando alta concentração de elétrons nos dois lados do equador geomagnético, e é designada de anomalia equatorial.

A ionosfera, nas regiões polares, varia, temporal e espacialmente; e a maior causa disto é que as linhas de força do campo geomagnético são quase verticais. Devido a este fato, os ventos e as explosões solares fazem com que ocorram mudanças na conduta das partículas carregadas, que podem ionizar os gases neutros da atmosfera, num processo conhecido como ionização por colisão. E o grau de colisão depende da posição do Sol e das condições de radiação do mesmo. Em torno dos pólos magnéticos, surgem anéis de alta ionização, formando a oval auroral, devido à interação das partículas carregadas com a atmosfera, cuja extensão é afetada diretamente pelo vento solar. Durante épocas de tranqüila atividade solar, as ovas estão centradas ao redor de 20 graus do pólo

geomagnético, com poucos graus de largura, e, em épocas de alta atividade, estendem-se em direção ao equador (Webster, 1993).

Além dessas condições anômalas, a manifestação ionosférica de ondas na atmosfera neutra, tem características periódicas, com duração da ordem de 10 minutos, designadas de perturbações ionosféricas em movimento (*Travelling Ionospheric Disturbances* - TID) (Klobuchar, 1991). A ocorrência do TID é fortemente dependente da direção das ondas atmosféricas neutras, uma vez que os elétrons não cruzam as linhas do campo magnético.

Irregularidades na ionosfera da Terra também podem produzir variações de curtos períodos nos sinais transionosféricos, provocadas por rápidas flutuações na fase e amplitude, devido aos efeitos da difração e refração, que causam um enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GPS, fazendo com que ocorra a perda do sinal. Essas rápidas flutuações são chamadas de cintilações, são análogas à refração atmosférica das estrelas (Webster, 1993) e provocam irregularidades no TEC, com extensões de poucos metros, até alguns quilômetros. Esse efeito de curto termo também é sazonal, devido ao ciclo solar de 11 anos, que aumenta e decresce, com o número de manchas solares.

A cintilação pode causar perdas de sinais, ou seja, perdas de ciclos, devido ao enfraquecimento de potência do sinal recebido (Seeber, 1993). A perda de sinais está, também, relacionada ao sistema de recepção do receptor GPS (antena/amplificador) e à técnica de processamento do sinal. As perdas de ciclos são maiores nos receptores que utilizam a quadratura do sinal, para o processamento, e menos nos que empregam a correlação do código (Wanninger, 1993).

A região de média latitude exhibe a menor quantidade de distúrbio, enquanto a região abrangida pelo equador magnético, estendendo-se a ± 30 graus, é a que apresenta maiores distúrbios, devido à cintilação; e significantes efeitos podem ocorrer nas regiões polares e auroral. Na região equatorial, os mais fortes efeitos são encontrados entre as latitudes ± 10 graus (Wanninger, 1993).

Na região equatorial, os horários de cintilação mais intensos são limitados a uma hora, após o pôr do Sol, até aproximadamente à meia noite local. Na região brasileira, as ocorrências de cintilações são mínimas, de abril até agosto, e máximas, de setembro a março (Campos et. al., 1993).

3 AJUSTAMENTO PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS E CONTROLE DE QUALIDADE

3.1 Introdução

O ajustamento de observações é um ramo da matemática aplicada. Tem por objetivo proporcionar uma solução única para problemas onde o número de observações (ou medidas) é redundante e o sistema de equações inconsistente, bem como a estimativa da precisão da solução adotada. A inconsistência do sistema de equações é devida às flutuações probabilísticas das observações e faz com que um determinado subconjunto de dados proporcione valores diferentes de um outro subconjunto. A solução única, nesses problemas, é dada pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), desenvolvido, independentemente, por Gauss, em 1795 e Legendre, em 1805.

Pode-se, também, com base nas técnicas do ajustamento, detectar a presença de erros grosseiros em um conjunto de observações, efetuar o planejamento da coleta de dados e saber, a priori, se atenderão as prescrições estabelecidas.

O ajustamento beneficiou-se, nas últimas décadas, da concisão da linguagem matricial e do desenvolvimento ocorrido na computação eletrônica, que tornou exeqüível a manipulação de matrizes de elevadas dimensões, bem como das técnicas estatísticas, empregadas na análise do ajustamento, que pode dizer a respeito da confiabilidade e qualidade dos resultados .

Pode-se, em resumo, dizer que (Gemael, 1994):

A partir de observações redundantes sujeitas a flutuações probabilísticas e de uma estimativa de sua precisão, o AJUSTAMENTO tem por objetivo:

- estimar, mediante a aplicação de modelos matemáticos adequados e do MMQ, um valor único para cada uma das incógnitas do problema;*
- estimar a precisão de tais incógnitas e a eventual correlação entre elas.*

O termo observação ou medida, aqui tomadas como sinônimos, é freqüentemente usado na prática, para referir-se à operação, e também para o resultado da operação. Os valores numéricos das observações são de fundamental importância para a ciência e engenharia, pois submetem o instrumento à análise e manipulação.

As observações possuem uma propriedade inerente a elas, conhecida de flutuações probabilísticas, pois, quando se repete, n vezes, a medida de uma grandeza, os n valores não são idênticos, mas estão dispersos numa certa região ou intervalo. Essas flutuações, tradicionalmente, são classificadas como erros aleatórios.

Nos casos mais simples, realizam-se medidas diretamente sobre as próprias grandezas incógnitas (observações diretas). Algumas vezes, as incógnitas se ligam, por equações de condições (observações diretas condicionadas). Em outras, medem-se grandezas que se vinculam com as incógnitas (ou parâmetros), através de relações funcionais conhecidas (observações indiretas).

Sempre que se necessita de descrever, matematicamente, uma realidade física, recorre-se a fórmulas, expressões ou equações que representam tal realidade com suficiente aproximação. O modelo matemático é definido como sendo um sistema teórico, que descreve uma situação física ou uma série de eventos. Desta forma, tal descrição não necessita explicar, totalmente, a situação física, mas relacionar somente os aspectos ou propriedades de interesse. Tendo em vista que o modelo serve para um propósito particular, o mesmo pode apresentar-se de formas diferentes para uma mesma situação física, dependendo, portanto, do propósito em questão. Como exemplo, o modelo teórico está estritamente relacionado à aproximação desejada, tal como a representação da Terra ou parte dela, realidade física nas disciplinas de Topografia e Geodésia, que se utilizam dos modelos teóricos, tais como: o plano, a esfera e o elipsóide.

O modelo matemático é, freqüentemente, composto de duas partes, dividido em modelo funcional e modelo estocástico. O modelo funcional constitui a parte determinística da realidade física ou evento em consideração. O modelo estocástico descreve as propriedades não determinísticas (estocásticas) das variáveis envolvidas, particularmente aquelas representando as observações. Os modelos funcional e estocástico devem ser tratados juntos, podendo ter várias combinações.

Quando as medidas são planejadas, um modelo funcional é, usualmente, escolhido, para representar o sistema físico com o qual as medidas estão associadas. As medidas são feitas usualmente, com a finalidade de avaliar valores para alguns ou todos os parâmetros do modelo funcional

O modelo estocástico descreve as propriedades estatísticas das observações, que sempre estão sujeitas a incontáveis influências. Elas podem estar

sujeitas às influências físicas, que não podem ser completamente controladas, resultando em uma certa variabilidade no resultado, quando as observações são repetidas. Têm-se, ainda, como causas, além das físicas, as imperfeições instrumentais e a falibilidade humana, que produzem os erros sistemáticos e grosseiros. Mesmo nos equipamentos automáticos, uma falha no equipamento pode levar a erros grosseiros, porém com menor frequência.

Do ponto de vista estatístico, observações com erros grosseiros não podem ser consideradas como pertencentes à amostra, não podendo ser usadas com as outras observações. Todas as observações contaminadas de erros grosseiros devem simplesmente ser rejeitadas; em alguns casos, a detecção do erro é fácil, erro de grande magnitude; em outros, somente empregando-se técnicas estatísticas.

Os erros sistemáticos são aqueles oriundos de causas conhecidas; podem, na maioria das vezes, ser evitados, através de técnicas especiais de observação e ou processamento, ou eliminados, mediante a aplicação de fórmulas fornecidas pela teoria. Do ponto de vista estatístico, a repetição de observações não auxiliará na detecção de erros sistemáticos, pois eles afetam as observações da mesma forma. Exagerando, pode-se dizer que, quando uma observação contém efeitos sistemáticos, não há nada de errado com a observação, mas sim com a sua interpretação, isto é, o modelo funcional não é apropriado. Por exemplo, um triângulo sobre a superfície terrestre pode ser tratado por um dos três modelos funcionais: plano, esférico ou elipsoidal. A escolha inadequada pode resultar em erros sistemáticos. O modelo funcional deve ser estabelecido, de modo que os efeitos sistemáticos sejam considerados. Isto pode ser feito de várias maneiras, uma

delas consiste em eliminar os erros sistemáticos, antes de efetuar o ajustamento; e, na outra, o efeito deve ser considerado como uma incógnita e determinado no processo de ajustamento.

Com frequência, os efeitos sistemáticos não são introduzidos no modelo matemático, mas corrigindo as observações. Dessa forma, as observações são substituídas por outra série de valores.

As observações, bem como o resultado do ajustamento, são, freqüentemente, analisadas, na prática, pela precisão e acurácia ou exatidão. Acurácia refere-se ao grau de concordância de uma estimativa e o seu valor verdadeiro e está vinculada a efeitos aleatórios (flutuações probabilísticas) e sistemáticos. Assim, enquanto a precisão expressa o grau de proximidade da observação com sua média, vincula-se apenas a efeitos aleatórios. A acuracidade reflete a tendência. Já a precisão reflete a dispersão, por exemplo, de uma observação.

3.2 Método dos Mínimos Quadrados

É oportuno, uma vez mais, lembrar que só faz sentido falar-se em ajustamento ou aplicação do MMQ, quando se dispõe de observações redundantes.

No MMQ, estimam-se as variáveis estocásticas X (parâmetros) e sua precisão Σ_X (matriz variância-covariância (MVC) dos parâmetros), a partir de amostras L_b , observadas com precisão Σ_{L_b} (MVC das observações). Estão envolvidos nos problemas de ajustamento três espaços:

- o espaço das observações ou medidas R^n ;

- o espaço do modelo matemático R^m ; e
- o espaço dos parâmetros incógnitos R^u .

Métodos particulares poderão envolver um ou dois espaços. O modelo matemático funcional que inter-relaciona esses espaços constitui-se em um sistema de equações lineares (ou linearizadas) incompatível, ou seja, inconsistente. A incompatibilidade procede das flutuações probabilísticas, que são propriedade característica das observações.

O conjunto original de observações, que será denotado pelo vetor L_b , inclui observações redundantes e inconsistentes com o modelo. Após o ajustamento, é substituído por um outro, representado por L_a , que satisfaz o modelo.

O conjunto dos valores estimados para L_a é diferente do conjunto original L_b . A diferença entre ambos os vetores é dada por:

$$V = L_a - L_b, \quad (3.1)$$

que é conhecido como vetor dos resíduos. Então:

$$L_a = L_b + V. \quad (3.2)$$

O vetor L_a , que satisfaz o modelo, depende, obviamente, da escolha do vetor V . Como efetuar essa escolha ? (Gemael, 1994).

O princípio do MMQ estabelece que:

$$\phi = V^T P V = \text{mínimo}, \quad (3.3)$$

conhecida como forma quadrática fundamental do MMQ, onde V é o vetor dos resíduos e P a matriz peso das observações, dada por:

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{L_b}^{-1}, \quad (3.4)$$

onde σ_0^2 é um escalar conhecido como fator de variância *a priori* e Σ_{L_b} a matriz variância-covariância das observações.

É importante frisar que a aplicação do princípio do MMQ não requer conhecimento *a priori* da distribuição de probabilidade associada às observações. Quando a distribuição é normal, o método de Máxima Verossimilhança proporciona resultados iguais aos do MMQ (Gemael, 1994).

O vetor dos resíduos tem um importante papel, após o processo de ajustamento. É, muitas vezes, possível analisar os elementos de V , a fim de testar o modelo (funcional e estocástico) e as observações.

3.3 Ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados

O modelo matemático é o ponto inicial da filosofia do ajustamento. Uma vez definido o modelo, aspectos práticos e computacionais são empregados, para seleccionar os métodos de ajustamento, pelo MMQ. A relação entre as fases do ajustamento é mostrada na figura 3.1 (Mikhail, 1976).

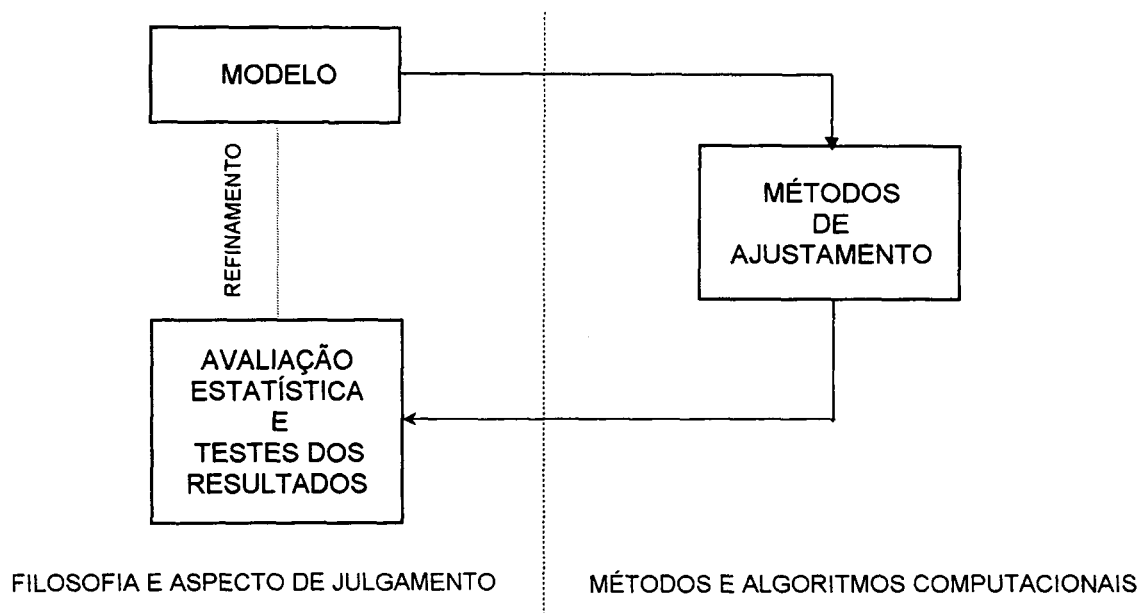


Figura 3.1 - Relação entre as fases do ajustamento
(Fonte: Mikhail, 1976)

Depois de realizado o ajustamento, um outro passo necessário é a avaliação estatística dos resultados, isto é, uma operação de julgamento dos modelos (funcional e estocástico) e das observações. A análise estatística poderá conduzir para um refinamento, se o modelo original for constatado ser inadequado ou ocorrer a rejeição de observações.

Dependendo das variáveis (observações e ou parâmetros) envolvidas no modelo, o ajustamento pode ser realizado por um dos métodos: correlatos, paramétrico ou combinado (Gemael, 1994). Apenas o método paramétrico será apresentado, por ser o que se aplicará neste trabalho.

Além disto, podem ser impostas restrições nos parâmetros envolvidos no ajustamento, designadas por injunções. Uma equação de injunção é constituída somente de parâmetros. Na prática, as injunções nos parâmetros ocorrem, quando

alguns ou todos os parâmetros devem satisfazer algumas relações advindas da geometria ou de características físicas do modelo.

Quando um parâmetro é mantido fixo no ajustamento, tem-se a injunção designada de absoluta. Neste caso, a variância do parâmetro é considerada nula. Se a variância do parâmetro for conhecida, ele será tratado como observações adicionais ou pseudo-observações (L'_b), constituindo a chamada injunção relativa. E, quando há uma relação funcional explícita entre os parâmetros, que devem obedecer a uma determinada condição geométrica ou física, podendo ou não ser conhecidos os seus valores, tem-se o caso das injunções funcionais.

As equações de condições, bem como as injunções envolvidas nos problemas de ajustamento, podem ser lineares ou não. Entretanto, os tratamentos pelo MMQ são realizados, em geral, com funções lineares. Quando as equações no modelo são não lineares, faz-se uma expansão em série, geralmente com a série de Taylor, onde os termos de ordem superior à primeira são negligenciados.

Quando se utilizam modelos linearizados, um conjunto de valores aproximados (X_0) para as incógnitas é exigido. A escolha desses valores é um aspecto importante, para resolver o problema. Infelizmente não há um caminho único para sua escolha. Em algumas situações, a experiência é relevante; em outras, os cálculos abreviados, a partir dos valores observados, podem ser empregados. No caso de modelos não lineares, não se podem admitir, como valores ajustados finais, aqueles obtidos na primeira etapa do ajustamento. É necessária a realização de iterações. Para tal, critério de convergência deve ser estabelecido, a fim de decidir-se sobre o término da iteração (Mikhail, 1976).

3.4 Método Paramétrico com Injunção

O método paramétrico é também designado como ajustamento de observações indiretas, ou, ainda, como método das equações de observações. Cada observação proporciona uma equação. Denotando-se por n o número total de observações, têm-se, então, n equações. As equações serão de tal forma, que se pode explicitá-las, em função dos u parâmetros envolvidos. Admitindo-se s injunções, ter-se-á igual número de observações adicionais.

3.4.1 Parâmetros Ajustados

O modelo matemático é composto por:

$$L_a = F(X_a), \quad (3.5)$$

$$L'_a = G(X_a). \quad (3.6)$$

onde:

L_a - vetor ($n \times 1$) das observações ajustadas;

L'_a - vetor ($s \times 1$) dos parâmetros injuncionados ajustados;

X_a - vetor ($u \times 1$) dos parâmetros ajustados;

F - função que relaciona L_a com X_a , podendo ser linear ou não;

G - função que relaciona L'_a com X_a , podendo ser linear ou não.

No processo de linearização, utilizam-se valores aproximados (X_0) para os parâmetros incógnitos (X_a), como ponto de expansão das funções $F(X_a)$ e $G(X_a)$ na série de Taylor.

Seja, então:

$$L_a = L_b + V, \quad (3.7)$$

onde:

L_b - vetor ($n \times 1$) dos valores observados;

V - vetor ($n \times 1$) dos resíduos.

Pode-se escrever que:

$$L_b + V = F(X_a). \quad (3.8)$$

Linearizando a segunda parcela da equação com a série de Taylor, tem-se que:

$$L_b + V = F(X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} X. \quad (3.9)$$

Designando a função dos parâmetros aproximados por L_0 :

$$L_0 = F(X_0), \quad (3.10)$$

e a matriz das derivadas parciais das equações em relação aos parâmetros, por A:

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0}, \quad (3.11)$$

tem-se que:

$$L_b + V = L_0 + AX, \quad (3.12)$$

ou

$$V = AX + L_0 - L_b. \quad (3.13)$$

Representado a diferença entre L_0 e L_b por L, ou seja:

$$L = L_0 - L_b. \quad (3.14)$$

Assim, obtém-se o modelo matemático linearizado do método paramétrico:

$$V = AX + L. \quad (3.15)$$

O segundo modelo é obtido da linearização da equação de injunção:

$$L'_a = G(X_a), \quad (3.16)$$

Similarmente ao modelo principal, tem-se:

$$L'_b + V' = G(X_a), \quad (3.17)$$

que, na forma linearizada, é dada por:

$$L'_b + V' = G(X_0) + \left. \frac{\partial G}{\partial X_a} \right|_{X_0} X, \quad (3.18)$$

com:

$$G(X_0) = L'_0, \quad (3.19)$$

$$\left. \frac{\partial G}{\partial X_a} \right|_{X_0} = C, \quad (3.20)$$

$$L'_0 - L'_b = L', \quad (3.21)$$

tem-se que:

$$V' = C X + L'. \quad (3.22)$$

Em resumo, os modelos linearizados são compostos de n equações de observações e s equações de injunções (uma para cada injunção), respectivamente, dados por:

$${}_n V_1 = {}_n A_{u \ u} X_1 + {}_n L_1, \quad (3.23)$$

$${}_s V'_1 = {}_s C_{u \ u} X_1 + {}_s L'_1. \quad (3.24)$$

As equações (3.23) e (3.24) representam um sistema compatível de $n+s$ equações, onde se tem, como incógnitas, $n+s$ resíduos e u parâmetros. O número de incógnitas ($n+s+u$) é maior do que o número de equações ($n+s$). Aplicando o MMQ:

$$\phi = V^T P V + V'^T P_{inj} V' = \text{mínimo}, \quad (3.25)$$

obtém-se que:

$$X = -(A^T P A + C^T P_{inj} C)^{-1} (A^T P L + C^T P_{inj} L'), \quad (3.26)$$

ou

$$X = -(N + N')^{-1} (U + U'). \quad (3.27)$$

sendo:

N e N' - matrizes ($u \times u$) dos coeficientes das equações normais;

U e U' - vetores ($u \times 1$) dos termos independentes;

P_{inj} - matriz peso ($s \times s$) das injunções ($P_{inj} = \sigma_0^2 \Sigma_{L_b}^{-1}$).

Admitindo-se que a matriz $(N+N')$ é não singular, as componentes do vetor X convertem os parâmetros aproximados em ajustados:

$$X_a = X_0 + X. \quad (3.28)$$

Quando a matriz peso das injunções relativas for diagonal e cada uma das equações de injunção contiver somente um parâmetro, a matriz N' e o vetor U' serão, respectivamente, P_{inj} e $P_{inj}L'$. O procedimento de introdução de injunções, neste caso, é muito útil computacionalmente, porque se forma a matriz N e o vetor U , conforme o modelo do método paramétrico. E, a partir daí, se um dado parâmetro (j) é injuncionado, posicionam-se, dentro da matriz N e do vetor U , os elementos correspondentes a (j) . A esses elementos adiciona-se P_{inj} , correspondente a (j) em N , e o produto $P_{inj}L'$, aos elementos do vetor U .

Esse tratamento é conveniente numericamente, mantém o modelo paramétrico e possibilita padrões especiais para matriz A e N , que são importantes para a eficiência numérica.

3.4.2 Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados

A estimativa de um valor ou de um conjunto de valores (parâmetros) deve vir acompanhada de um indicador da qualidade dos mesmos. A MVC dos parâmetros

ajustados é obtida, aplicando a lei de propagação de covariâncias na expressão (3.27), ou seja, na expressão que fornece o vetor das correções dos parâmetros aproximados (Gemael, 1994):

$$\Sigma_{x_s} = \hat{\sigma}_0^2 (N + N')^{-1}. \quad (3.29)$$

Pode-se, então, observar a importância de se ter disponível a inversa da matriz $(N+N')$, pois ela, a menos do fator de variância, proporciona a MVC dos parâmetros.

O fator de variância a posteriori é calculado através da expressão:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V + V'^T P_{inj} V'}{n - u + s}. \quad (3.30)$$

3.5 Controle de Qualidade

O controle de qualidade é um assunto amplo e complexo, cujo objetivo é o de estabelecer e assegurar a qualidade de um produto ou serviço para certas condições de consumo ou utilização. Os fatores considerados no controle de qualidade de maior importância em um produto ou serviço dividem-se em economia, precisão e confiabilidade. A economia é um fator importante num projeto, pois expressa o custo total, envolve operações de planejamento, execução, coleta de dados, processamento, etc. A precisão manifesta a dispersão dos resultados na ausência de erros, sendo expressa pela matriz variância-covariância. E a

confiabilidade descreve a capacidade das observações redundantes em detectar erros nos modelos e ou nas observações, com certo nível de confiança. A confiabilidade é a probabilidade de um sistema, ou parte dele, ter desempenho satisfatório, sem falhas, em certas condições de uso, durante um período específico de tempo.

Um procedimento geral será apresentado para detecção de erros, que consiste na análise da qualidade do ajustamento, baseado na estatística Qui-quadrado. Após a detecção de erro, a identificação ou localização da possível fonte causadora é necessária. Isto consiste numa procura entre todos os prováveis causadores de erros. No caso das observações, por exemplo, o teste estatístico *data snooping* pode ser empregado. Finalmente, identificada a observação com erro, a adaptação é necessária, para eliminar sua influência dos parâmetros. Em resumo, os procedimentos dos testes aplicados no controle de qualidade subdividem-se em três etapas, designadas de: detecção, identificação e adaptação (Teunissen, 1985).

3.5.1 Teste Estatístico para Detecção de Erro

O fato de arbitrar-se um valor qualquer para o fator de variância (σ_0^2) não acarretará em nenhum efeito no resultado do ajustamento. Essa escolha é feita antes do ajustamento, para fixação dos pesos. Portanto é designado como fator de variância *a priori* (Gemael, 1994).

Após o ajustamento, pode-se estimar um valor para o fator de variância em

função dos resíduos, chamado de fator de variância a *posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$). Com os valores de σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$, pode-se fazer uma análise da qualidade do ajustamento, através da estatística Qui-quadrado (χ^2), por meio de um teste estatístico, onde se testa a hipótese básica (Camargo, 1992) :

$$H_0 : E\{\hat{\sigma}_0^2\} = \sigma_0^2 \quad \text{contra} \quad H_1 : E\{\hat{\sigma}_0^2\} > \sigma_0^2. \quad (3.31)$$

As hipóteses formuladas neste teste descrevem que, na hipótese básica (H_0), os fatores de variâncias a posteriori e a priori são estatisticamente iguais, contra uma hipótese alternativa (H_1), que supõe que a variância a posteriori é maior que a priori. Para a validação de uma das hipóteses, compara-se o valor calculado por:

$$T = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} (n - u + s), \quad (3.32)$$

que tem distribuição Qui-quadrado, com $v = n - u + s$ graus de liberdade, com os valores teóricos da distribuição Qui-quadrado ($\chi_{v,1-\alpha}^2$).

A hipótese básica não é rejeitada, ao nível de significância α , no teste estatístico, se:

$$T < \chi_{v,1-\alpha}^2. \quad (3.33)$$

Caso contrário, significa que há problemas no ajustamento, ou seja, a estatística calculada (T) não tem distribuição Qui-quadrado com $(n-u+s)$ graus de liberdade. Assim, uma análise deve ser feita para verificar as possíveis razões ou circunstâncias que levaram à falha no teste, dentre as quais se deve verificar se:

- o modelo funcional é adequado à realidade física;
- a matriz variância-covariância das observações está apropriadamente determinada, ou seja, o modelo estocástico é apropriado;
- erros grosseiros ou erros sistemáticos não estão envolvido no processo de ajustamento;
- o sistema não é mal condicionado; e
- não existe erro de cálculo no processo de ajustamento.

O teste acima descrito, conhecido, também, como teste estatístico Global ou n -dimensional (Teunissen, 1985), é empregado, para detectar erros nos modelos e observações. Para a identificação de observação com erro, geralmente um teste unidimensional, isto é, um teste que verifica uma observação por vez é utilizado.

3.5.2 Teste Estatístico para Identificação das Observações com Erro Grosseiro

Existem diversos métodos para identificação de erros grosseiros (*outlier*), entre os quais se destacam o método de Pope (Pope, 1976), o *danish method* (Krarup e Kubik, 1982) e o *data snooping* ou método de Baarda (Baarda, 1968). O

método de Pope baseia-se num teste que emprega a distribuição *Tau*, é utilizado, quando o fator de variância a priori é desconhecido, e, neste caso, não se aplica o teste de análise da qualidade do ajustamento. O *danish method* é um estimador robusto, geralmente empregado nos programas de aerotriangulação. E, quando o fator de variância é conhecido, ou seja, arbitrado no início do ajustamento, utiliza-se do método de Baarda.

A suposição de que exista um único erro grosseiro, no conjunto de observações, faz com que o *data snooping* seja pouco eficiente no caso em que estão presentes muitos erros.

A identificação da observação eivada de erro, usando o método de Baarda, é efetuada, através do cálculo das correções normalizadas (*W*), dadas por (Baarda, 1968):

$$W = \frac{C^T P V}{\sqrt{C^T P \Sigma_v P C}}, \quad (3.34)$$

onde o vetor *C* representa a redundância parcial, *P* a matriz dos pesos e Σ_v a MVC dos resíduos, dada por:

$$\Sigma_v = \hat{\sigma}_0^2 (P^{-1} - A N^{-1} A^T). \quad (3.35)$$

O vetor *C* é um vetor *n*-dimensional, contendo elementos unitários para as observações a serem testadas, e zero para as outras posições. O numerador da equação (3.34) representa o chamado resíduo transformado e o denominador, o

erro estimado. O resultado é a estatística W , conhecida como correção normalizada, cujo valor é empregado no teste estatístico.

Analisando-se um resíduo por vez, o vetor C tem a seguinte formação:

$$C^T = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \dots & i & \dots & n \end{pmatrix}, \quad (3.36)$$

onde i representa a observação a ser testada, na presença de estrutura diagonal para a MVC das observações, a expressão (3.34) é reduzida à chamada equação de *data snooping* (Krakiwsky e Biacs, 1990):

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}}, \quad (3.37)$$

com $1 \leq i \leq n$, onde w_i e v_i representam a correção normalizada e o resíduo da i -ésima observação, respectivamente, e σ_{v_i} o i -ésimo desvio padrão do resíduo.

A estatística w_i tem, como distribuição, a raiz quadrada da distribuição F com graus de liberdade igual a 1 e ∞ , ou seja, $\sqrt{F_\alpha(1, \infty)}$. A raiz quadrada da distribuição F tem distribuição normal padrão, isto é, $\sqrt{F_\alpha(1, \infty)} = N_{\alpha/2}(0, 1)$. Então (Chen et al., 1987):

$$w_i \sim N_{\alpha/2}(0, 1). \quad (3.38)$$

As hipóteses formuladas neste teste descrevem que, na hipótese básica, a observação i não contém erro (∇l_i), contra uma hipótese alternativa, que supõe o oposto:

$$H_0 : \nabla l_i = 0 \quad \text{contra} \quad H_1 : \nabla l_i \neq 0. \quad (3.39)$$

A hipótese básica não é rejeitada a um determinado nível de significância α_0 ($\alpha = 2 \cdot n \cdot \alpha_0$, desigualdade de Bonferroni (Chen et al., 1987)), se:

$$-N_{\alpha_0/2} < w_i < N_{\alpha_0/2}. \quad (3.40)$$

Caso contrário, a observação i contém erro. Como se trata de um teste, que verifica somente uma observação por vez e dependendo da magnitude do erro (∇l_i), mais do que um resíduo podem exceder os valores críticos, detectando mais de uma observação com erro. Neste caso, é excluída a observação que contém a maior estatística. E o teste deve ser repetido, até que todas as observações com erro sejam eliminadas. Porém cuidados devem ser tomados, quanto à redundância do sistema.

3.5.3 Adaptação

Realizados os testes, com a finalidade de detectar e identificar as observações com erro, o próximo passo, caso tenha sido identificada alguma

observação com erro, consiste em retirar a influência que o erro provoca nos resultados. Essa etapa é conhecida como adaptação. Ela depende do tipo de processamento. Geralmente consiste do cálculo da influência a ser retirada dos parâmetros, devido à observação, ou do re-processamento, sem a utilização da observação eivada de erro (Camargo, 1992).

3.5.4 Teste e Seleção dos Parâmetros

A seleção dos parâmetros, no caso de modelos que envolvem polinômios ou séries, é um importante aspecto para uma correta interpretação dos resultados, pois influencia diretamente na matriz dos coeficientes das equações normais. Segundo Zhong (1997), a exclusão de alguns parâmetros do modelo sempre resulta em variâncias menores para os parâmetros estimados e para o resultado da interpolação. Assim, para obter parâmetros com melhor precisão e, algumas vezes, com menores tendências, os parâmetros insignificantes devem ser excluídos do modelo.

3.5.4.1 Teste de Significância do Modelo

Após a detecção de erros, o teste de significância dos parâmetros é utilizado, para avaliar se os parâmetros do modelo são significantes ou não. Esse teste é baseado no teste F e tem, por hipótese básica, que (Zhong, 1997):

$$H_0: x_i = 0 \quad \text{contra} \quad H_1: x_i \neq 0, \quad (3.41)$$

sendo x_i o parâmetro em análise, apresentando variância $\sigma_{x_i}^2$.

Para a validação de uma das hipóteses, compara-se o valor calculado para a estatística F_i :

$$F_i = \frac{x_i^2}{\sigma_{x_i}^2}, \quad (3.42)$$

que tem distribuição F, com 1 e r ($r = n-u+s$) graus de liberdade para o numerador e denominador, respectivamente.

A hipótese básica não é rejeitada, ao nível de significância α , no teste estatístico, se:

$$F_i < F_{1-\alpha}(1, r), \quad (3.43)$$

caso em que é mantido no modelo. Caso contrário deverá ser eliminado. Na equação (3.43), $F_{1-\alpha}(1, r)$ representa o valor teórico da distribuição.

3.5.4.2 Controle das Correlações dos Parâmetros

O teste F para parâmetros individuais pode ser fortemente influenciado pela correlação dos parâmetros. Assim, para evitar a influência da correlação, é necessário um controle de suas correlações, através dos coeficientes de correlação:

$$\rho_{x_i x_j} = \frac{\sigma_{x_i x_j}}{\sqrt{\sigma_{x_i}^2 \sigma_{x_j}^2}}, \quad (3.44)$$

onde $\sigma_{x_i x_j}$ representa a covariância entre os parâmetros x_i e x_j , e $\sigma_{x_i}^2$ e $\sigma_{x_j}^2$ as variâncias dos mesmos. Esses elementos são obtidos na MVC dos parâmetros ajustados.

De acordo com Zhong (1997), se:

$$\rho_{x_i x_j} \geq \rho_\alpha, \quad (3.45)$$

os parâmetros x_i e x_j são fortemente correlacionados. Um valor crítico a ser adotado para o teste é, por exemplo, $\rho_\alpha = 0,90$. Neste caso, parâmetro com menor significância pode ser excluído do modelo.

3.5.4.3 Critérios para Otimização do Modelo

Através do teste de significância e controle das correlações, os parâmetros do modelo podem ser selecionados. Todavia nada se pode afirmar, se eles são ótimos ou não, porque os resultados dos testes dos parâmetros dependem dos valores críticos e variam com as diferentes combinações dos parâmetros. Para selecionar parâmetros ótimos, um procedimento iterativo deve ser realizado, e os diferentes resultados devem ser comparados como o mesmo critério de otimização. Os seguintes critérios são os mais usados para tal seleção (Zhong, 1997):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u + s} \rightarrow \text{mínimo}, \quad (3.46)$$

$$V_P = (n + u + s) \hat{\sigma}_0^2 \rightarrow \text{mínimo}, \quad (3.47)$$

$$S_P = \frac{1}{n - u - 1 + s} \hat{\sigma}_0^2 \rightarrow \text{mínimo}, \quad (3.48)$$

$$C_P = \frac{V^T P V}{\hat{\sigma}_{0_c}^2} - (n - 2u + s) \rightarrow \text{mínimo}, \quad (3.49)$$

$$AIC = (n+s) \ln(V^T P V) + 2u \rightarrow \text{mínimo}, \quad (3.50)$$

onde:

V_P - variância das tendências da interpolação;

S_P - média do erro médio quadrático da interpolação;

C_P - definido como uma variável estocástica;

$\hat{\sigma}_{0_c}^2$ - fator de variância a posteriori estimado com o modelo completo; e

AIC - chamado de *Akaike Information Amount*.

Dessa forma, baseado neste critério, um modelo ótimo pode ser determinado, seguindo o procedimento iterativo proposto por Zhong (1997):

- a) definir a quantidade de parâmetros do modelo;
- b) resolver o ajustamento com o modelo completo;
- c) calcular a estatística F e determinar o valor crítico;
- d) excluir do modelo os parâmetros não significantes e ajustar novamente;

- e) compara o resultado dos itens b) e d), se os resultados do item d) são melhores do os que do b), serão usados como novos valores do modelo;
- f) repetir os itens b) – e) com as novas combinações de parâmetros, até que nenhum resultado melhor ocorra;
- g) resultado: parâmetros ótimos para o modelo.

4 OBSERVÁVEIS GPS E SUAS COMBINAÇÕES LINEARES

4.1 Sinais Emitidos Pelos Satélites GPS

Os sinais emitidos pelos satélites GPS são derivados da multiplicação eletrônica da frequência fundamental ($f_0 = 10,23 \text{ MHz}$) produzida por osciladores altamente estáveis (relógios de césio e de rubídio), com estabilidade entre 10^{-12} e 10^{-13} . A figura 4.1 mostra, de forma simplificada, como são derivados, atualmente, os sinais emitidos pelos satélites.

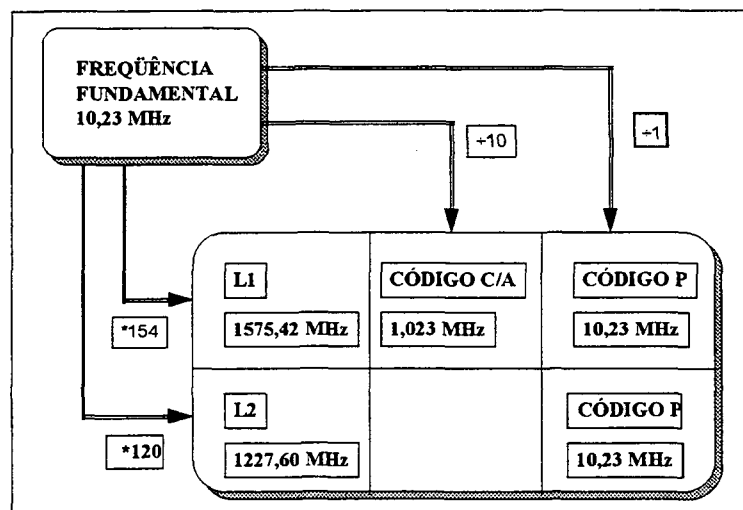


Figura 4.1 - Sinais emitidos pelos satélites GPS
(Fonte: Monico, 1998)

A partir da frequência fundamental, são geradas duas portadoras na banda L do espectro, que permitem operações em quaisquer condições de tempo, denominadas de L_1 e L_2 , com as seguintes frequências:

$$f_1 = 154 \text{ f}_0 = 1575,42 \text{ MHz}, \quad (4.1)$$

e

$$f_2 = 120 \text{ f}_0 = 1227,60 \text{ MHz}, \quad (4.2)$$

cujos comprimentos de onda são, respectivamente:

$$\lambda_1 \cong 19,03 \text{ cm},$$

$$\lambda_2 \cong 24,45 \text{ cm}.$$

A portadora L_1 é modulada em fase com os dois códigos, conhecidos como código C/A (código de fácil aquisição) e código P (código preciso) e com as mensagens de navegação. Já a portadora L_2 é modulada apenas pelo código P, além das mensagens de navegação.

A frequência do código C/A corresponde a 10% da frequência fundamental e seu valor é dado por:

$$f_{C/A} = 1,023 \text{ MHz}, \quad (4.3)$$

e o código P tem frequência igual a:

$$f_P = 10,23 \text{ MHz}, \quad (4.4)$$

cujos comprimentos de onda são, respectivamente:

$$\lambda_{C/A} \cong 293,1 \text{ m},$$

$$\lambda_P \cong 29,31 \text{ m}.$$

Os dois códigos binários (P e C/A) são gerados por algoritmos, que, de forma pseudo aleatória, fazem com que seus valores resultem numa seqüência de (+1) e (-1), razão pela qual são denominados de ruídos falsamente aleatórios (*pseudo random noise* - PRN). Cada satélite tem seu próprio código C/A, designado de PRN, e que se repete a cada milisegundos. O código P é repetido somente após 267 dias. Todos os satélites geram o mesmo código, mas cada um transmite um segmento que equivale a uma semana das 38 possíveis.

Somente usuários autorizados têm acesso aos códigos P, quando o AS (*Anti Spoofing*) está ativado. O AS refere-se à não permissão de acesso ao código P, através da aplicação de criptografia, resultando num código protegido, denominado de Y. O código Y é resultante de uma combinação dos códigos P e W. Este último é gerado numa razão de 50 bps, ao passo que o P apresenta uma razão de $10,23 \times 10^6$ bps (Monico, 1995). O AS foi implementado em 31 de janeiro de 1994, em todos os satélites do Bloco II, e pode ser ativado e desativado.

4.2 Observáveis GPS

Das observáveis obtidas, a partir de informações dos sinais transmitidos pelos satélites GPS, podem-se identificar quatro tipos (Seeber, 1993):

- medidas de pseudodistâncias, a partir do código;

- diferenças de pseudodistâncias, a partir da contagem integrada Doppler;
- fase da onda portadora ou diferença da fase da onda portadora; e
- diferenças do tempo de viagem do sinal, a partir das medidas interferométricas.

Destes quatro tipos de observáveis GPS, duas são mais importantes e utilizadas em posicionamento: a pseudodistância obtida, a partir do código, e a fase de batimento da onda portadora, também referida como fase da onda portadora ou simplesmente fase da portadora. A primeira é, geralmente, usada para navegação, enquanto, em levantamentos de alta precisão, se utiliza a fase da portadora (Leick, 1995). Dependendo do tipo de receptor, nem todas as observáveis são disponíveis. Em receptores GPS de uma frequência, obtêm-se somente dados na frequência L_1 .

4.2.1 Pseudodistância

A pseudodistância entre o satélite e a antena do receptor é obtida, pela multiplicação da velocidade da luz pelo tempo de deslocamento necessário para a máxima correlação da sequência do código emitido pelo satélite e a réplica gerada pelo receptor. Em razão do não sincronismo entre os relógios do satélite e do receptor, esta observável é designada de pseudodistância.

A técnica de correlação do código é aplicada, para acessar a portadora, quando o AS não está ativado. Ela é, normalmente, empregada, para acessar a portadora L_1 , através do código C/A, e o acesso à portadora L_2 é conseguido somente pelos usuários que têm permissão para utilizar o código P criptografado,

ou seja, o código Y. Como a portadora L_2 tem modulada sobre ela apenas o código P, que está sujeito ao AS, ela só pode ser acessada por uma das várias técnicas disponíveis para o processamento do sinal, tais como: quadratura do sinal, correlação cruzada e a técnica denominada P-W (Monico, 1995). Dependendo do receptor, pode-se obter uma, duas ou três pseudodistâncias, através dos códigos C/A e P_1 em L_1 e do código P_2 em L_2 .

Os relógios dos receptores e dos satélites não são sincronizados entre si e não coincidem com o sistema de tempo GPS. Devido ao não sincronismo entre os relógios dos receptores e dos satélites, dos quais derivam os códigos, a quantidade medida difere da distância geométrica entre o satélite e o receptor. Além disto, a propagação, através da troposfera e da ionosfera, que provoca um retardo, afeta, diretamente, a medida da pseudodistância.

A pseudodistância é obtida, pela multiplicação do tempo de propagação do sinal, resultante do processo de correlação, pela velocidade da luz no vácuo, num sistema teórico, livre de erros, pode ser dada por:

$$P_r^s = c (t_r - t^s), \quad (4.5)$$

onde:

P_r^s - representa a pseudodistância entre o satélite (s), no instante de transmissão do sinal, e a antena do receptor (r), no instante de recepção do sinal, na escala de tempo GPS;

c - velocidade da luz no vácuo;

t_r - tempo de recepção do sinal no receptor; e

t^s - tempo de transmissão do sinal no satélite;

Os estados dos relógios do satélite e do receptor, que representam o erro de sincronismo entre o sistema de tempo GPS (T_{GPS}) e os respectivos relógios, são relacionados com o mesmo, a partir das expressões:

$$T_{GPS}^s = t^s - dt^s, \quad (4.6)$$

$$T_{GPS,r} = t_r - dt_r, \quad (4.7)$$

no instante de transmissão e recepção do sinal respectivamente, onde:

dt^s - erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante t^s ; e

dt_r - erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante t_r .

Assim, de (4.5) tem-se que:

$$P_r^s = c (T_{GPS,r} - T_{GPS}^s) + c (dt_r - dt^s), \quad (4.8)$$

que pode ser reescrita, agora, considerando os efeitos da atmosfera, como:

$$P_r^s = \rho_r^s + c (dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + \varepsilon_P, \quad (4.9)$$

onde:

ρ_r^s - representa a distância geométrica entre o satélite (s) e a antena do receptor (r);

I_r^s - erro sistemático, devido à refração ionosférica;

T_r^s - erro sistemático, devido à refração troposférica; e

ε_p - erros aleatórios e sistemáticos não modelados, tais como: multicaminho, ruído dos receptores e satélites, efemérides, efeito relativístico, etc.

A distância geométrica (ρ_r^s) ou raio vetor, em termos de coordenadas cartesianas, é dada por:

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}, \quad (4.10)$$

onde:

X^s, Y^s, Z^s - coordenadas cartesianas do satélite; e

X_r, Y_r, Z_r - coordenadas cartesianas do receptor.

4.2.2 Fase de Batimento da Onda Portadora

A medida da fase da portadora é obtida, através da diferença entre a fase do sinal recebido do satélite (ϕ^s) e sua réplica gerada pelo receptor (ϕ_r). A observação é, portanto, a parte fracional de um ciclo. Na primeira medida, não se sabe o

número inteiro de ciclos (N_r^s), designado de ambigüidade, entre o receptor e o satélite. A partir daí, o receptor realiza a contagem de ciclos inteiros, até a época seguinte. Isto faz com que a medida da fase da onda portadora seja ambígua, com relação a um número de ciclos inteiros, envolvidos entre o receptor e os satélites na primeira época de observação. A fase observada (ϕ_r^s) no instante de recepção, na escala de tempo do receptor, em unidades de ciclos, é dada por (Monico, 1995):

$$\phi_r^s = \phi^s - \phi_r + N_r^s. \quad (4.11)$$

Uma expressão similar à equação (4.9) pode ser escrita. Em unidades de comprimento e de forma completa, é dada por:

$$\lambda \phi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_r^s + T_r^s + \lambda N_r^s + \varepsilon_\phi, \quad (4.12)$$

onde:

λ - comprimento da onda do sinal da portadora (m ou cm);

ϕ_r^s - medida da fase da portadora (em ciclos);

N_r^s - ambigüidade da fase; e

ε_ϕ - erros aleatórios e demais erros não modelados.

Os demais termos são iguais aos da observável pseudodistância, porém o efeito da ionosfera comporta-se de maneira oposta, devido ao avanço sofrido pelo sinal, ao atravessar a ionosfera.

A precisão da medida da fase (σ_ϕ) corresponde, aproximadamente, a 0,01 do comprimento da onda, que, nos casos de L_1 ($\lambda_1 = 19,03$ cm) e L_2 ($\lambda_2 = 24,45$ cm) correspondem, aproximadamente, a 2 mm e 3 mm, respectivamente (Gemaël, 1991). De forma análoga, para os códigos C/A, com comprimento de onda de 293,1 m e P com 29,3 m, obtém-se, considerando a mesma porcentagem, 3 m e 0,3 m, respectivamente para suas precisões ($\sigma_{C/A}$ e σ_P). Porém, com a tecnologia digital, tem-se conseguido melhor precisão para a fase e código (Webster, 1993).

4.3 Combinação Linear das Observáveis

O objetivo dessa seção é mostrar que, a partir das combinações lineares das observáveis, se podem formar vários modelos matemáticos para o processo de estimação dos parâmetros incógnitos (posições, ambigüidades, erros não modelados, etc.). E, dependendo do tipo de aplicação e do nível de precisão desejada, podem-se fazer os seguintes tipos de combinações lineares entre as observáveis (Seeber, 1993):

- entre observações de diferentes estações;
- entre observações de diferentes satélites;
- entre observações de diferentes épocas;

- entre observações de mesmo tipo; e
- entre observações de diferentes tipos.

Além da simples diferença entre as observáveis de diferentes receptores, diferentes satélites ou épocas, têm-se a dupla diferença, que envolve diferentes receptores e satélites, e a tripla diferença, envolvendo diferentes receptores, satélites e épocas. As duas últimas são as mais utilizadas em posicionamento com GPS.

Nos próximos itens, serão descritas as combinações lineares mais empregadas no processo de estimação de parâmetros.

4.3.1 Combinação Linear Entre Observações do Mesmo Tipo

A combinação linear das observáveis GPS do mesmo tipo pode ser formada entre as fases da portadora ou entre as pseudodistâncias. Uma quantidade não limitada de combinações podem ser realizadas com diversos interesses, dentro dos quais se destacam (Wübbena, 1989):

- produzir ambigüidade inteira, através de coeficientes inteiros;
- ter um razoável comprimento de onda, para ajudar a fixar as ambigüidades;
- manter baixa a influência da ionosfera;
- manter pequena a medida do ruído.

A combinação linear (L_i) das fases portadora ϕ_1 e ϕ_2 , respectivamente em L_1 e L_2 , é dada por (Wübbena, 1989):

$$L_i = \phi_{n,m} = n \phi_1 + m \phi_2, \quad (4.13)$$

onde i identifica a combinação linear, n e m são coeficientes, ϕ_1 é a fase medida da portadora L_1 e ϕ_2 a fase medida da portadora L_2 .

Da relação entre tempo, fase e frequência ($t = \phi_i / f_i$), tem-se:

$$L_i = n f_1 t + m f_2 t = f_{n,m} t, \quad (4.14)$$

onde:

$$f_{n,m} = n f_1 + m f_2, \quad (4.15)$$

é a frequência derivada do sinal. O comprimento de onda da combinação linear é dada por:

$$\lambda_{n,m} = c / f_{n,m}, \quad (4.16)$$

e a nova ambigüidade por:

$$N_{n,m} = n N_1 + m N_2. \quad (4.17)$$

Se n e m são inteiros, a ambigüidade $N_{n,m}$ também o será.

O desvio padrão (σ_{L_i}) da combinação linear das fases é obtido, através da propagação de covariância das observações das fases originais, em unidades de ciclos. Se não há correlação entre ϕ_1 e ϕ_2 , tem-se:

$$\sigma_{L_i} = \sigma_{\phi_{n,m}} = \sqrt{n^2 \sigma_{\phi_1}^2 + m^2 \sigma_{\phi_2}^2} . \quad (4.18)$$

Admitindo que $\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = \sigma_{\phi}$, obtém-se uma expressão similar à apresentada por Wübbena (1989):

$$\sigma_{L_i} = \sqrt{n^2 + m^2} \sigma_{\phi}, \quad (4.19)$$

que, em unidades de comprimento, é expressa como:

$$\sigma_{L_i} = \lambda_{n,m} \sqrt{n^2 + m^2} \sigma_{\phi}. \quad (4.20)$$

As combinações lineares mais simples, são conhecidas como *wide lane* (L_W) e *narrow lane* (L_N). A *observável* obtida com a *wide lane* é resultante da combinação linear da fase portadora em L_1 e L_2 , com $n = 1$ e $m = -1$, e a *narrow lane* é derivada com $n = m = 1$. Ambas são dadas, respectivamente, por (Wübbena, 1989, Hofmann-Wellenhof et al. 1993, Seeber, 1993):

$$L_W = \phi_{L1-L2} = \phi_1 - \phi_2 , \quad (4.21)$$

e

$$L_N = \phi_{L1+L2} = \phi_1 + \phi_2 . \quad (4.22)$$

Os correspondentes comprimentos de onda, conforme a equação (4.16), são dados por:

$$\lambda_W = \lambda_{L1-L2} = 86,2 \text{ cm}, \quad \text{com } \sigma_{LW} = 19,4 \text{ mm},$$

$$\lambda_N = \lambda_{L1+L2} = 10,7 \text{ cm}, \quad \text{com } \sigma_{LN} = 2,1 \text{ mm}.$$

O comprimento da onda do sinal obtido com a *wide lane* é por volta de quatro vezes maior que as originais. Entretanto é influenciada pelo efeito da ionosfera, que não é eliminado e apresenta um ruído seis vezes maior do que as observações originais. Por outro lado, na combinação *narrow lane*, o comprimento da onda do sinal é duas vezes menor que as originais, o que torna difícil a resolução das ambigüidades. O seu uso se restringe principalmente a bases curtas e, devido ao baixo ruído das observações, produz melhores resultados (Seeber, 1993).

Várias combinações lineares podem ser obtidas, mas um dos principais usos de tais combinações é reduzir o efeito da ionosfera sobre as observáveis. A observável denominada livre da ionosfera (*ionospheric free*) é designada por L_0 , sendo dada por (Seeber, 1993 e Wübbena, 1989):

$$L_0 = \frac{L_W + L_N}{2} . \quad (4.23)$$

A partir da equação (4.23), podem-se obter as diversas expressões para a combinação linear livre da ionosfera (L_0), utilizadas nos softwares de processamento de dados GPS. Tem-se:

$$L_0 = \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 \phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 \phi_2 \right), \quad (4.24)$$

apresentado por Seeber (1993), e

$$L_0 = \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_1 - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_2 \right), \quad (4.25)$$

conforme Leick (1995) e Monico (1998), além de

$$L_0 = \left(\phi_1 - \frac{f_2}{f_1} \phi_2 \right), \quad (4.26)$$

que consta em Hofmann-Wellenhof et al. (1993).

A combinação linear livre da ionosfera é muito utilizada no posicionamento de precisão, especialmente em redes envolvendo bases longas, pois os efeitos da ionosfera são consideravelmente reduzidos. O processamento da observável L_0 , em conjunto com a *wide lane*, é muito útil na etapa de detecção de perdas de ciclos (Monico, 1998) e na resolução das ambigüidades (Seeber, 1993). No processamento de bases curtas, o ruído da observável L_0 torna-se dominante, e não

oferece vantagem no seu emprego, pois os efeitos da ionosfera são praticamente eliminados no posicionamento relativo (Monico, 1998).

O sinal ionosférico, formado entre a observável *wide lane* e *narrow lane*, é também importante, porque contém o efeito total da ionosfera. A expressão para seu cálculo é dada por (Seeber, 1993, Wübbena, 1989):

$$L_I = L_N - L_W. \quad (4.27)$$

A diferença do atraso devido à ionosfera, na combinação linear das observáveis das fases das portadoras em L_1 e L_2 , é obtida por meio da expressão (Wübbena, 1989):

$$I_{L_I} = n I_{\phi_{1r}}^s + m I_{\phi_{2r}}^s, \quad (4.28)$$

sendo o efeito de primeira ordem nas medidas de fase em L_1 e L_2 diferentes, e são dados, respectivamente, em ciclos, por:

$$I_{\phi_{1r}}^s = -\frac{C_I}{f_1}, \quad (4.29)$$

e

$$I_{\phi_{2r}}^s = -\frac{C_I}{f_2}, \quad (4.30)$$

com C_I dado por:

$$C_i = \frac{40,3 \text{ TEC}}{c}, \quad (4.31)$$

onde c representa a velocidade da luz no vácuo.

Assim, o efeito da ionosfera, resultante nas combinações lineares, pode ser calculado, a partir da expressão (4.28), como:

$$I_{L_i} = \frac{-C_i}{f_1 f_2} (n f_2 + m f_1), \quad (4.32)$$

que pode ser transformado em unidades de tempo por:

$$I_{tL_i} = \frac{I_{L_i}}{f_{n,m}} = \frac{-C_i}{f_1 f_2} \frac{n f_2 + m f_1}{n f_1 + m f_2} = \frac{-C_i}{f_1 f_2} V_i, \quad (4.33)$$

onde V_i representa o fator de ampliação do efeito da ionosfera.

A tabela 4.1 apresenta um resumo das propriedades de algumas combinações lineares. A coluna $\lambda_{1/2}$ contém o comprimento de onda para receptores que utilizam a técnica de quadratura em L_2 . O desvio padrão das fases observadas (ϕ_1, ϕ_2) foi considerado como sendo de 0,1 radianos, que correspondem a 3 mm.

Tabela 4.1 - Combinação linear das fases da portadora (Fonte: Seeber, 1993)

Sinal (L_i)	n	m	λ (cm)	$\lambda_{1/2}$ (cm)	V_i	σ_{L_i} (mm)
L_1	1	0	19,0	19,0	0,779	3,0
L_2	0	1	24,4	12,2	1,283	3,9
L_W	1	-1	86,2	43,1	-1,000	19,4
L_N	1	1	10,7	5,4	1,000	2,1
L_{12}	-1	2	34,1	34,1	2,168	12,1
L_{21}	2	-1	15,6	7,8	0,457	5,5
L_{32}	3	-2	13,2	13,2	0,234	7,6
L_{43}	4	-3	11,4	5,7	0,070	9,1
L_{97}	9	-7	5,4	2,7	0,004	9,7
L_{54}	5	-4	10,1	10,1	-0,055	10,3
L_{65}	6	-5	9,0	4,5	-0,154	11,2
L_{76}	7	-6	8,2	8,2	-0,235	12,0
L_{87}	8	-7	7,5	3,8	-0,301	12,6
L_{98}	9	-8	6,9	6,9	-0,357	13,2
L_{109}	10	-9	6,4	3,2	-0,404	13,6
L_0	-	-	$\approx 5,4$	$\approx 2,7$	0,000	10,0
L_1	-	-	$\approx 10,7$	$\approx 5,4$	2,000	20,0

Combinações lineares ($C_i = P_{n,m} = n P_1 + m P_2$) das pseudodistâncias também são possíveis, desde que se utilize o código P, pois o código C/A não é disponível na portadora L_2 . Alguns exemplos de combinações são apresentadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Combinação linear das pseudodistâncias (Fonte: Seeber, 1993)

Sinal (C_i)	n	m	V_i	σ_{C_i} (m)
C_1	1	0	-0,779	0,47
C_2	0	1	-1,283	0,47
C_W	1	-1	1,000	2,68
C_N	1	1	-1,000	0,33

4.3.2 Combinação Linear Entre Observáveis de Diferentes Tipos.

A combinação entre a pseudodistância e medida da fase da onda portadora é importante para posicionamento em tempo real (Hofmann-Wellenhof et al., 1993) e é muito utilizada em posicionamento com o sistema Diferencial GPS (DGPS), bem como na determinação da ambigüidade dos sinais da portadora, devido ao fato das pseudodistâncias não conterem ambigüidades. A determinação de ambigüidade, na prática, é conseguida, após algumas épocas de coleta de dados, com resolução de 3 a 5 ciclos para receptores com código C/A e corresponde a uma acurácia de 1m (Seeber, 1993).

O princípio da combinação deve-se, primeiramente, à investigação intensiva de Hatch (1982). O algoritmo é amplamente encontrado na literatura, por exemplo, em Hatch (1982), Goad (1990) e Jin (1996).

A partir da equação (4.12), para uma época t_k , podem-se escrever as equações para ambas as portadoras, como:

$$\lambda_1 \phi_{1rk}^s = \rho_{rk}^s + c(dt_{rk} - dt_k^s) - I_{1rk}^s + T_{1rk}^s + \lambda_1 N_{1r}^s + \varepsilon_{\phi_{1k}}, \quad (4.34)$$

$$\lambda_2 \phi_{2rk}^s = \rho_{rk}^s + c(dt_{rk} - dt_k^s) - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{1rk}^s + T_{2rk}^s + \lambda_2 N_{2r}^s + \varepsilon_{\phi_{2k}}, \quad (4.35)$$

onde k representa a época t_k , e a relação: $f_1^2/f_2^2 I_{1rk}^s = I_{2rk}^s$ vem da equação (2.19).

A diferença da fase da portadora entre duas épocas (t_{k-1} e t_k) fornece a uma distância relativa ou medida integrada Doppler, que, em inglês, é designada de

delta range. Denotando as diferenças, no intervalo $(t_{k-1}$ e t_k), respectivamente, para L_1 e L_2 , como $D_{k-1,k}^1$ e $D_{k-1,k}^2$, tem-se que:

$$D_{k-1,k}^1 = \lambda_1 \phi_{1r k}^s - \lambda_1 \phi_{1r k-1}^s, \quad (4.36)$$

e

$$D_{k-1,k}^2 = \lambda_2 \phi_{2r k}^s - \lambda_2 \phi_{2r k-1}^s. \quad (4.37)$$

A partir da equação (4.36) e (4.37), uma distância relativa livre do efeito da ionosfera pode ser obtida, por meio da expressão:

$$D_{k-1,k} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^2. \quad (4.38)$$

Fazendo duas vezes a equação (4.38) menos a equação (4.36) e (4.37), pode-se projetar a diferença em distância da fase da portadora em equivalente diferença em distância da pseudodistância, respectivamente para L_1 e L_2 . Assim:

$$M_{k-1,k}^i = 2 D_{k-1,k} - D_{k-1,k}^i, \quad (4.39)$$

para $i = 1, 2$.

A quantidade $M_{k-1,k}^i$ tem uma importante propriedade, que é a de conter as mesmas informações que fazem parte da diferença $P_{ir k}^s - P_{ir k-1}^s$, porém com ruído reduzido (Jin, 1996), que corresponde a 0,7 do ruído da pseudodistância original.

Para uma época inicial t_0 , a pseudodistância filtrada pela fase da portadora é dada pela própria pseudodistância observada, isto é, $P_{ir0/0}^s = P_{ir0}^s$. A partir dela, um valor predito para pseudodistância, para uma época t_k , pode ser obtido, através da expressão (Jin, 1996):

$$P_{irk/k-1}^s = P_{irk-1/k-1}^s + M_{k-1,k}^i, \quad (4.40)$$

para $i = 1, 2$ e $k = 1, 2, \dots, t_k$. Na equação (4.40), $P_{irk-1/k-1}^s$, representa a pseudodistância filtrada na época t_{k-1} .

A pseudodistância filtrada pela fase da portadora, para a época t_k , é dada por (Jin, 1996):

$$P_{irk/k}^s = P_{irk/k-1}^s + \frac{1}{k+1} (P_{irk}^s - P_{irk/k-1}^s). \quad (4.41)$$

Teunissen (1991) mostra que a equação (4.41) não é estritamente um estimador de mínimos quadrados recursivo, já que a suposição de que a variância da fase da portadora é zero, é implicitamente feita. A expressão teórica para a filtragem da pseudodistância é dada por:

$$P_{irk/k}^s = P_{irk/k-1}^s + \frac{\sigma_{P_i}^2 + k \sigma_{\phi_i}^2}{k (\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\phi_i}^2)} (P_{irk}^s - P_{irk/k-1}^s) \quad (4.42)$$

No processo de filtragem, quando ocorrem perdas de ciclos, o algoritmo deve ser reiniciado.

A variância da pseudodistância filtrada é obtida, através da expressão (Teunissen, 1991):

$$\sigma_{P_{rk/k}}^2 = \frac{\sigma_{Pi}^2 (\sigma_{Pi}^2 + k \sigma_{\phi i}^2)}{k (\sigma_{Pi}^2 + \sigma_{\phi i}^2)}, \quad (4.43)$$

para $i = 1, 2$.

O valor mínimo da variância é obtido para o limite de $k \rightarrow \infty$ (Teunissen, 1991):

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sigma_{P_{rk/k}}^2 = \frac{\sigma_{Pi}^2}{1 + (\sigma_{\phi i}^2 / \sigma_{Pi}^2)}, \quad (4.44)$$

para $i = 1, 2$

4.3.3 Equações de Simples Diferença

A simples diferença das observáveis pode ser formada entre dois receptores (Δ), dois satélites (∇) e duas épocas (δ). Em geodésia, a simples diferença entre dois receptores é usualmente a mais utilizada. A figura 4.2 mostra o princípio da simples diferença entre dois receptores (r_i e r_j), rastreando, simultaneamente, o mesmo satélite (s^p).

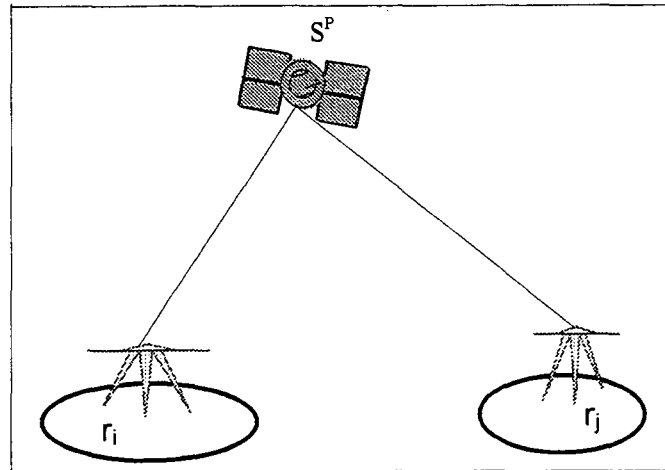


Figura 4.2 - Simples diferença entre receptores
(Fonte: Monico, 1998)

A simples diferença entre receptores, de uma forma genérica, pode ser representada por:

$$\Delta(\bullet)_{ij}^P = (\bullet)_{r_i}^{S^P} - (\bullet)_{r_j}^{S^P} . \quad (4.45)$$

No caso em que medidas simultâneas de pseudodistâncias (código P ou C/A) são realizadas em ambos os receptores ao mesmo satélite, pode se formar a simples diferença de pseudodistância:

$$\Delta P_{ij}^P = \Delta \rho_{ij}^P + c \Delta dt_{ij} + \Delta I_{ij}^P + \Delta T_{ij}^P + \varepsilon_{\Delta P_{ij}^P} , \quad (4.46)$$

sendo Δdt_{ij} , ΔI_{ij}^P e ΔT_{ij}^P as correções diferenciais para os relógios dos receptores, para a ionosfera e a troposfera, respectivamente, e $\varepsilon_{\Delta P_{ij}^P}$ representa os erros aleatórios e não modelados das observáveis.

Na simples diferença, o erro do relógio (dt^s) do satélite é eliminado. Para bases curtas, os erros devidos às influências da ionosfera e da troposfera, bem como os das órbitas, são minimizados (Wells et al., 1986).

Similarmente, para dois receptores coletando, simultaneamente, a fase da portadora, a simples diferença de fase é dada por:

$$\Delta\lambda\phi_{ij}^p = \Delta\rho_{ij}^p + c \Delta dt_{ij} - \Delta I_{ij}^p + \Delta T_{ij}^p + \lambda \Delta N_{ij}^p + \varepsilon_{\Delta\lambda\phi_{ij}^p}. \quad (4.47)$$

A simples diferença entre dois satélites (∇) observados, simultaneamente, pela mesma estação, é livre do erro, devido ao relógio do receptor (dt_r). Na simples diferença entre épocas (δ), para o mesmo satélite e receptor, a ambigüidade é eliminada, pois a mesma permanece constante ao longo do tempo, desde que nenhuma perda de ciclos ocorra.

4.3.4 Equação de Dupla Diferença

A dupla diferença é obtida, fazendo-se a diferença entre duas simples diferenças, envolvendo, portanto, dois receptores e dois satélites. A figura 4.3 ilustra o princípio da dupla diferença.

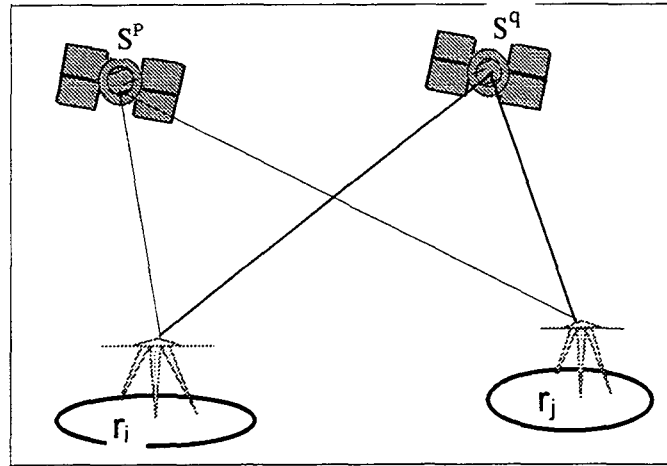


Figura 4.3 - Dupla diferença entre receptores e satélites
(Fonte: Monico, 1998)

A equação de dupla diferença ($\nabla \Delta(\bullet)_{ij}^{pq} = \Delta(\bullet)_{ij}^p - \Delta(\bullet)_{ij}^q$) entre dois receptores e dois satélites é dada por:

$$\nabla \Delta P_{ij}^{pq} = \nabla \Delta \rho_{ij}^{pq} + \nabla \Delta I_{ij}^{pq} + \nabla \Delta T_{ij}^{pq} + \varepsilon_{\nabla \Delta P_{ij}^{pq}}, \quad (4.48)$$

para as pseudodistâncias.

No caso de medida de fase da onda portadora, a dupla diferença é dada como:

$$\nabla \Delta \lambda \phi_{ij}^{pq} = \nabla \Delta \rho_{ij}^{pq} - \nabla \Delta I_{ij}^{pq} + \nabla \Delta T_{ij}^{pq} + \lambda \nabla \Delta N_{ij}^{pq} + \varepsilon_{\nabla \Delta \lambda \phi_{ij}^{pq}}, \quad (4.49)$$

onde:

$$\nabla \Delta N_{ij}^{pq} = \Delta N_{ij}^p - \Delta N_{ij}^q = (N_{r_i}^{S^p} - N_{r_j}^{S^p}) - (N_{r_i}^{S^q} - N_{r_j}^{S^q}). \quad (4.50)$$

A dupla diferença faz com os erros dos relógios dos receptores sejam removidos. Essa observável é, normalmente, preferida nos processamentos de dados GPS, pois elimina ou reduz a maioria dos erros sistemáticos, sem que a propagação de erros seja acentuada.

4.3.5 Equação de Tripla Diferença

A observável da tripla diferença ($\delta\nabla\Delta(\bullet)$) é dada pela diferença entre duas duplas diferenças de duas épocas ($\delta = t_1 - t_2$). Aplicando-se a equação da dupla diferença para as pseudodistâncias obtidas em diferentes épocas com os receptores (r_i e r_j) e simultâneas aos satélites (s^p e s^q), obtém-se a tripla diferença de pseudodistância:

$$\delta\nabla\Delta P_{ij}^{pq} = \delta\nabla\Delta\rho_{ij}^{pq} + \delta\nabla\Delta I_{ij}^{pq} + \delta\nabla\Delta T_{ij}^{pq} + \varepsilon_{\delta\nabla\Delta P_{ij}^{pq}}. \quad (4.51)$$

No caso de medida de fase da portadora, a tripla diferença de fase é dada como:

$$\delta\nabla\Delta\lambda\phi_{ij}^{pq} = \delta\nabla\Delta\rho_{ij}^{pq} - \delta\nabla\Delta I_{ij}^{pq} + \delta\nabla\Delta T_{ij}^{pq} + \varepsilon_{\delta\nabla\Delta\lambda\phi_{ij}^{pq}}, \quad (4.52)$$

onde o último termo das duas equações contém os erros aleatórios e não modelados.

A tripla diferença de pseudodistância não oferece vantagens sobre as outras combinações de pseudodistâncias (Monico, 1995), e é idêntica à tripla diferença de fase, exceto para o sinal do efeito da ionosfera.

Além dos erros reduzidos pela dupla diferença, nas medidas de fase da portadora, a ambigüidade não comparece na tripla diferença. Isto é uma propriedade atrativa para este tipo de observável, a qual permite, através dos resíduos, detectar perdas de ciclos e erros grosseiros. Normalmente, ela não é usada na solução final, uma vez que o ruído da observável é maior, além de introduzir correlação temporal entre as várias combinações de épocas distintas (Monico, 1998).

4.4 Matriz Variância-Covariância das Observáveis

As correlações são divididas em dois grupos, que consistem das correlações físicas e matemáticas. Por exemplo, as observáveis de fases da portadora de um satélite, recebidas em dois receptores, são correlacionadas fisicamente, visto que se referem ao mesmo satélite. Usualmente, a correlação física não é levada em conta. O interesse principal está na correlação matemática (Hofmann-Wellenhof et al., 1993).

As observáveis originais, sejam de pseudodistâncias ou de fases, são assumidas não correlacionadas matematicamente, ou seja, são consideradas linearmente independentes no espaço e no tempo. A partir dessas, são derivadas as combinações lineares, que, por sua vez, se tornam correlacionadas. Portanto, tal correlação deve ser considerada no ajustamento.

A matriz variância-covariância (MVC) ou matriz covariância das observáveis originais é diagonal. Por exemplo, a MVC de um vetor ϕ_k que contém as observáveis coletadas em duas estações, durante uma época t_k , e arranjadas, como (Monico, 1995):

$$\phi_k = [\phi_1^1, \phi_1^2, \dots, \phi_1^n, \phi_2^1, \phi_2^2, \dots, \phi_2^n]^T, \quad (4.53)$$

é dada como:

$$\Sigma_{\phi_k} = \sigma^2 I, \quad (4.54)$$

sendo I a matriz identidade de ordem igual ao número de observações ($2n$) e σ^2 a variância da observação não diferenciada.

No caso da combinação linear das fases em L_1 e L_2 para a mesma época, tem-se que a MVC é dada por:

$$\Sigma_{L_i} = \sigma_{L_i}^2 I, \quad (4.55)$$

onde a matriz I tem a dimensão igual ao número de observáveis obtidas, e σ_{L_i} é dada pela expressão (4.19) ou (4.20), para ciclos ou unidades de comprimento, respectivamente.

A MVC da simples diferença entre observáveis também será uma matriz diagonal, portanto não correlacionada e dada pela expressão:

$$\Sigma_{\Delta\phi_k} = 2 \sigma^2 I, \quad (4.56)$$

com a matriz identidade de ordem n , que representa o número de simples diferenças.

Para o caso da simples diferença de fase, pode-se escrever o vetor $(\Delta\phi_k)$, como (Monico, 1995):

$$\Delta\phi_k = [I \vdots -I] \phi_k, \quad (4.57)$$

o símbolo (\vdots) representa uma matriz aumentada.

E, a partir da lei de propagação de covariância (Gemael, 1994), obtém-se a MVC da simples diferença de fase, dada pela expressão (4.56).

As observáveis de duplas diferenças são obtidas das simples diferenças e podem ser escritas, como (Monico, 1995):

$$\nabla\Delta\phi_k = C \Delta\phi_k, \quad (4.58)$$

onde $\nabla\Delta\phi_k$ é um vetor de dimensão $(n-1)$, contendo as duplas diferenças de fase. A matriz C $((n-1) \times n)$, que contém informações para a obtenção das duplas diferenças, pode ser derivada, por meio das formas denominadas diferença seqüencial e satélite de referência, referido, também, como método do satélite base (Monico, 1995). No primeiro método, a matriz C tem o seguinte padrão:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (4.59)$$

E, no caso do método em que se tem um satélite como base, a matriz C depende do satélite de referência. Se o satélite 1 é selecionado como base, a matriz C tem o seguinte aspecto (Monico, 1995):

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (4.60)$$

A MVC da dupla diferença é obtida, através da lei de propagação de covariância aplicada na equação (4.58) com a matriz C , dada por (4.59) ou (4.60), de onde se obtém, respectivamente:

$$\Sigma_{\nabla\Delta\phi_k} = 2 \sigma^2 \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (4.61)$$

e

$$\Sigma_{\nabla\Delta\phi_k} = 2 \sigma^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 2 \end{bmatrix}. \quad (4.62)$$

A MVC (4.61) e (4.62) são válidas para um grupo de observações simultâneas em duas estações. Vale salientar que a MVC (4.62) independe do satélite base selecionado (Monico, 1995). A MVC total será uma matriz bloco diagonal, formada por k sub-matrizes similares à (4.61) ou à (4.62), para t_k épocas de observações simultâneas.

A escolha do método, para formar a dupla diferença, não afeta os resultados, bem como o método, para formar a MVC. Entretanto Monico (1995) ressalta que, se um erro ocorrer em uma observação do satélite tomado como base, todas as duplas diferenças serão afetadas, ao passo que, no método da diferença seqüencial, no máximo, duas observações serão afetadas pelo erro.

As observáveis da tripla diferença obtida das duplas diferenças, de forma genérica para a pseudodistância ou fase da portadora, podem ser escritas como:

$$\delta\nabla\Delta = C \nabla\Delta. \quad (4.63)$$

A matriz C da tripla diferença tem o mesmo aspecto que a matriz dada pela expressão (4.59), e o vetor $(\nabla\Delta)$ das duplas diferenças das épocas sucessivas (t_1, t_2, \dots, t_k) , é dado como:

$$\nabla \Delta = [\nabla \Delta_{t1}, \nabla \Delta_{t2}, \dots, \nabla \Delta_{tk}]^T. \quad (4.64)$$

A MVC da tripla diferença entre sucessivas épocas (t_1-t_2, t_2-t_3, \dots), obtida da aplicação da lei de propagação de covariância na expressão (4.63), é dada por (Monico, 1995):

$$\Sigma_{\delta \nabla \Delta} = \begin{bmatrix} 2\Sigma_{\nabla \Delta} & -\Sigma_{\nabla \Delta} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -\Sigma_{\nabla \Delta} & 2\Sigma_{\nabla \Delta} & -\Sigma_{\nabla \Delta} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\Sigma_{\nabla \Delta} & 2\Sigma_{\nabla \Delta} & -\Sigma_{\nabla \Delta} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\Sigma_{\nabla \Delta} & 2\Sigma_{\nabla \Delta} \end{bmatrix}. \quad (4.65)$$

5 TÉCNICAS DE CORREÇÃO DOS EFEITOS DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA, PARA POSICIONAMENTO COM RECEPTORES DE UMA FREQUÊNCIA

5.1 Introdução

Os sinais GPS, no seu trajeto entre o satélite e a estação de rastreo, sofrem atraso no grupo e avanço na fase da portadora. Isto é devido à ionosfera, resultando num aumento nas distâncias obtidas, a partir do código, e diminuição nas obtidas, a partir da fase da portadora, de uma mesma quantidade, ainda que de sinais opostos. Este efeito é diretamente proporcional ao TEC e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Alguns métodos são empregados, para determinar o efeito sistemático, devido à refração da ionosfera na portadora L_1 dos receptores GPS de uma frequência. A quantificação desse efeito pode ser feita, através de:

- Coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação, utilizando o modelo *broadcast*,
- Observações coletadas com receptores GPS de uma frequência;
- Observações coletadas com receptores GPS de dupla frequência.

A modelagem da correção ionosférica para receptores GPS de uma frequência, de escala global, regional ou local, será apresentada e discutida sucintamente.

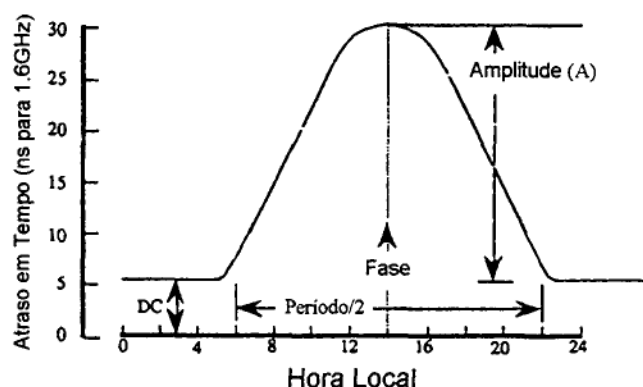


Fig. 5.1 - Representação da ionosfera, a partir das mensagens transmitidas
(Fonte : Newby et al., 1990)

O algoritmo empregado para calcular a correção ionosférica das medidas feitas com a portadora L_1 , além dos oitos coeficientes α_i e β_i , ($i = 0, \dots, 3$), utiliza a latitude (φ), a longitude (λ) geodésica da estação, o azimuth (Az), o ângulo de elevação (el) do satélite e o tempo GPS (T_{GPS}) da época de observação. As unidades angulares utilizadas nos cálculos são dadas em semicírculo (1 SC = 180 graus), enquanto a do tempo GPS, em segundos.

A seqüência do cálculo, para obter a correção, é, geralmente, dividida em etapas, tais como (Leick, 1995):

1) Cálculo do fator de inclinação (F):

$$F = 1 + 16 (0,53 - el)^3. \quad (5.1)$$

2) Cálculo da latitude do ponto ionosférico (φ_{IP}), ou seja, do ponto formado pela interseção do vetor satélite/receptor e a camada ionosférica de altitude

média igual a h_m (figura 2.3). No modelo de Klobuchar, adota-se altitude média (h_m) igual a 350 km:

$$\varphi_{IP} = \begin{cases} \varphi + \psi \cos(Az), & \text{se } |\varphi_{IP}| \leq 0,416; \\ 0,416 & , \quad \text{se } \varphi_{IP} > 0,416; \\ -0,416 & , \quad \text{se } \varphi_{IP} < -0,416. \end{cases} \quad (5.2)$$

A latitude geocêntrica (ψ) é dada por:

$$\psi = \frac{0,0137}{eI + 0,11} - 0,022. \quad (5.3)$$

3) Cálculo da longitude do ponto ionosférico (λ_{IP}):

$$\lambda_{IP} = \lambda + \frac{\varphi \sin(Az)}{\cos(\varphi_{IP})}. \quad (5.4)$$

4) Cálculo da latitude geomagnética (ϕ_m):

$$\phi_m = \varphi_{IP} + 0,064 \cos(\lambda_{IP} - 1,617). \quad (5.5)$$

5) Cálculo da hora local (t) do ponto ionosférico, para a época de observação:

$$t = \begin{cases} \lambda_{IP} 4,32 \times 10^4 + T_{GPS}, & \text{se } 0 \leq t < 86400; \\ \lambda_{IP} 4,32 \times 10^4 + T_{GPS} - 86400, & \text{se } t \geq 86400; \\ \lambda_{IP} 4,32 \times 10^4 + T_{GPS} + 86400, & \text{se } t < 0. \end{cases} \quad (5.6)$$

6) Cálculo do Período (P):

$$P = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_m^n, & \text{se } P \geq 72000; \\ 72000, & \text{se } P < 72000. \end{cases} \quad (5.7)$$

7) Cálculo da Amplitude (A):

$$A = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_m^n, & \text{se } A \geq 0; \\ 0, & \text{se } A < 0. \end{cases} \quad (5.8)$$

8) Cálculo da correção ionosférica, ao longo do caminho satélite/receptor na portadora L_1 (I_{1r}^s):

$$I_{1r}^s = \begin{cases} c F [DC + A \cos(x)], & \text{se } |x| < 1,57; \\ c F (DC), & \text{se } |x| > 1,57. \end{cases} \quad (5.9)$$

Sendo:

c - velocidade da luz no vácuo; $c = 299792458$ m/s;

DC - constante; DC = 5×10^{-9} segundos;

x - fase em radianos; e dada por::

$$x = \frac{2\pi(t - 14 \times 3600)}{P} \quad (5.10)$$

O modelo de Klobuchar compensa de 50% a 60% do efeito da ionosfera (Leick, 1995). É, portanto, inadequado, para modelar flutuações diárias da ionosfera e outras anomalias (Newby et al., 1990), devido à própria característica do modelo.

A tabela 5.1 mostra a relação entre as unidades de medida do efeito de primeira ordem e o TEC da ionosfera.

Tabela 5.1 – Relação entre as unidades de medida do efeito de 1ª ordem e o TEC (Fonte: Klobuchar, 1996)

L₂ - L₁ – Atraso diferencial do grupo
1 ns de atraso diferencial no código = $2,852 \times 10^6$ (el / m ²) = 1,556 ns de atraso em L ₁ = 0,464 m de erro na distância em L ₁
1 ns de atraso, medido em L ₁ = $1,8476 \times 10^6$ (el / m ²) = 0,300 m de erro na distância em L ₁
1 m de erro na distância medida em L ₁ = $6,15 \times 10^6$ (el / m ²) L ₂ = $3,73 \times 10^6$ (el / m ²)
1 TECU (Unidade de TEC = 1×10^6 (el / m ²)) = 0,352 ns de atraso diferencial = 0,542 ns de atraso em L ₁ = 0,163 m de erro na distância em L ₁ = 0,853 ciclos em avanço na fase em L ₁

5.3 Cálculo da Correção Ionosférica, a partir da Portadora L₁, Coletada com Receptores GPS de uma Frequência

Alguns modelos têm sido desenvolvidos, para calcular a correção da ionosfera com observações coletadas com a portadora L₁ nos receptores GPS, especialmente os que fazem uso do código C/A e da fase da portadora. O cálculo do erro devido à ionosfera é baseado na diferença entre as observações da pseudodistância e da fase da portadora. As equações de observação da pseudodistância e da fase da portadora, expressas em unidade métrica, para uma época t qualquer, são dadas por (Leick, 1995):

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{1r}^s + T_{1r}^s + S_{p1}^s + R_{p1} + \varepsilon_{p1}, \quad (5.11)$$

$$\lambda_1 \phi_{1r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_{1r}^s + T_{1r}^s + \lambda_1 N_{1r}^s + S_{\phi 1}^s + R_{\phi 1} + \varepsilon_{\phi 1}. \quad (5.12)$$

Na primeira equação, em relação à (4.9), acrescentaram-se os termos S_{p1}^s e R_{p1} , que representam, respectivamente, os erros sistemáticos do hardware do satélite e de receptor para as medidas da pseudodistância. E a (5.12), em relação à (4.12), foi acrescida dos termos $S_{\phi 1}^s$ e $R_{\phi 1}$, que representam os mesmos erros sistemáticos, ainda que relacionados à fase da portadora. Esses erros estão associados às alterações no oscilador do satélite, ao pré-amplificador e cabo da antena e ao receptor, constituindo as tendências instrumentais dos satélites e dos receptores.

A diferença entre as equações (5.11) e (5.12), para uma época t , é dada por:

$$P_{1r}^s - \lambda_1 \phi_{1r}^s = 2 I_{1r}^s - \lambda_1 N_{1r}^s + S_{p1}^s - S_{\phi 1}^s + R_{p1} - R_{\phi 1} + \varepsilon_{p1} - \varepsilon_{\phi 1}. \quad (5.13)$$

A equação resultante é expressa em função do erro, devido à ionosfera, da ambigüidade inicial, das tendências instrumentais dos satélites e do receptor, ou seja, dos atrasos instrumentais e de outros erros, tais como: o efeito do multicaminhamento da pseudodistância e da fase da portadora, etc. A equação (5.13) contém muitos termos incógnitos. Mesmo desprezando aqueles referentes às tendências instrumentais e os demais erros (ε_{p1} e $\varepsilon_{\phi 1}$), o atraso devido à ionosfera e à ambigüidade ainda não pode ser estimado separadamente, pois, a cada época t , é adicionada uma nova incógnita, a qual se refere ao efeito da ionosfera. Algumas soluções têm sido propostas, para modelar as principais características da ionosfera. Porém elas são limitadas, pela baixa acuracidade nas medidas das pseudodistâncias.

Num futuro próximo, espera-se poder calcular o erro devido à ionosfera com melhor exatidão do que a proporcionada pelo modelo padrão da ionosfera, ou seja, pelo modelo de Klobuchar (Leick, 1995), devido ao desenvolvimento da tecnologia envolvida nas antenas e nos receptores, proporcionando uma melhor resolução nas medidas das pseudodistâncias.

Alguns modelos utilizados para calcular a correção da ionosfera com medidas feitas em L_1 serão descritos a seguir (Leick, 1995):

5.3.1 Modelo da Lâmina Ionosférica

É considerado como sendo a forma mais simples para a modelagem do efeito da ionosfera, pois não considera a curvatura da Terra. A ionosfera é considerada uma superfície plana e de igual densidade, contendo uma distribuição homogênea de elétrons livres. O atraso ionosférico, ao longo do caminho satélite/receptor (I_{1r}^s), na portadora L_1 , é dado por:

$$I_{1r}^s = \frac{I_1^v}{\sin(el)} \quad (5.14)$$

O atraso da ionosfera na vertical (I_1^v) é considerado constante no modelo, e não depende do azimuth do satélite. Substituindo a equação (5.14) na (5.13), após negligenciar os erros sistemáticos dos instrumentos e demais erros, tem-se que:

$$P_{1r}^s - \lambda_1 \phi_{1r}^s = 2 I_1^v \frac{1}{\sin(el)} - \lambda_1 N_{1r}^s \quad (5.15)$$

O modelo acima, para uma série de observações da pseudodistância e fase da portadora, formará um sistema de equações. Então, aplicando-se o MMQ, pode-se estimar o atraso vertical (I_1^v) e a ambigüidade (N_{1r}^s), que constituem as incógnitas do modelo. As ambigüidades estimadas absorverão parte dos erros, devido às tendências do hardware do satélite ou do receptor, contanto que os mesmos sejam considerados como constantes durante o ajustamento.

5.3.2 Modelo Diário com Função Co-seno

Esse modelo leva em consideração a rotação da Terra e o movimento diário do Sol, com respeito à localização do receptor GPS. O atraso ionosférico na vertical é modelado pela função co-seno:

$$I_1^v = I_{1\max}^v \cos(h_s - 14), \quad (5.16)$$

onde h_s representa o ângulo horário do Sol, em horas. O atraso ionosférico máximo na vertical ($I_{1\max}^v$) ocorre próximo às 14:00 horas locais. Neste caso, o modelo a ser utilizado no ajustamento pelo método dos mínimos quadrados será:

$$P_{1r}^s - \lambda_1 \phi_{1r}^s = 2 I_{1\max}^v \cos(h_s - 14) \frac{1}{\sin(el)} - \lambda_1 N_{1r}^s. \quad (5.17)$$

5.3.3 Modelo do Ponto Ionosférico

O modelo do ponto ionosférico tem, basicamente, o mesmo princípio do modelo da camada ou lâmina ionosférica, porém utiliza uma camada ionosférica de altura média de 300 a 400 Km. O modelo dado pela expressão (5.14) é substituído por:

$$I_{1r}^s = \frac{I_1^v}{\sin(el')}. \quad (5.18)$$

O ângulo el' ($el' = 90^\circ - z'$) representa o ângulo de elevação do satélite no ponto ionosférico (IP), com z' obtido, através da equação (2.23).

Dessa forma:

$$P_{1r}^s - \lambda_1 \phi_r^s = 2I_1^v \frac{1}{\sin(el')} - \lambda_1 N_{1r}^s. \quad (5.19)$$

Para um conjunto de observações feitas em diversas épocas, é possível, então, calcular o atraso ionosférico vertical e, conseqüentemente, o efeito ionosférico sofrido pela pseudodistância e fase da portadora.

5.3.4 Outros Modelos

Modelos mais sofisticados também têm sido desenvolvidos. Pode-se citar o modelo experimentado por Cohen et al., que utiliza a função (Cohen et al, 1992, apud Leick, 1995):

$$I_{1r}^s = J_1 + J_{11} \sin(\varphi^*) + C_{11} \cos(\varphi^*) \cos(\lambda^*) + S_{11} \cos(\varphi^*) \sin(\lambda^*), \quad (5.20)$$

para modelar o atraso ionosférico. Nessa função, φ^* e λ^* representam a latitude e a longitude do ponto sub-ionosférico (SIP) (figura 2.3), num sistema de coordenadas ligado ao Sol, e os demais elementos representam os parâmetros incógnitos do modelo.

Leick (1995) ainda cita o modelo polinomial, proposto por Coco et al. (1991), que emprega um polinômio, para modelar o atraso ionosférico:

$$I_{ir}^s = C_1 + C_2\varphi^* + C_3\lambda^* + C_4(\varphi^*)^2 + C_5(\lambda^*)^2 + C_6\varphi^*\lambda^*. \quad (5.21)$$

Substituindo estas funções na equação (5.13), têm-se novos modelos para o cálculo do atraso ionosférico, cujos coeficientes podem ser estimados no ajustamento de observações.

5.4 Cálculo da Correção Ionosférica, a partir de Medidas Feitas com Receptores GPS de dupla Frequência.

A principal técnica para correção do efeito da refração ionosférica é baseada em medidas da pseudodistância ou da fase da portadora, obtidas por receptores de dupla frequência. Ela proporciona correções mais acuradas dos efeitos da refração da ionosfera. A técnica que utiliza a fase da onda portadora é mais acurada do que a da pseudodistância, proporcionando acurácia com padrões geodésicos (Newby et al., 1990). Em contrapartida; receptores de duas frequências são mais caros do que os de uma frequência.

5.4.1 Correção Ionosférica, a partir das Medidas de Pseudodistância

Na derivação dos modelos, tanto o erro devido ao não sincronismo do relógio do satélite e do receptor quanto o erro das efemérides e da refração da troposfera não serão considerados. Uma vez que esses efeitos contaminam cada uma das medidas efetuadas em ambas as frequências da mesma maneira; não comprometerão, portanto, o método (Georgiadiou, 1994), haja vista que haverá diferenciação entre essas medidas, fazendo com que os mesmos sejam cancelados.

As equações simplificadas para as pseudodistâncias, em ambas as frequências portadoras (f_1 e f_2), são dadas por:

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + I_{1r}^s + S_{p1}^s + R_{p1} + \varepsilon_{p1}, \quad (5.22)$$

$$P_{2r}^s = \rho_r^s + I_{2r}^s + S_{p2}^s + R_{p2} + \varepsilon_{p2}.$$

O atraso ionosférico I_{ir}^s ($i=1,2$), em metros, dado pela equação (2.20) é proporcional, numa primeira aproximação, ao TEC, ao longo do caminho do sinal e inversamente proporcional ao quadrado da frequência f_i (Hz), ou seja:

$$I_{ir}^s = \frac{40,3 \text{ TEC}^s}{f_i^2}, \quad (5.23)$$

onde o sobrescrito s representa o satélite rastreado.

Fazendo a diferença entre as equações (5.22), obtém-se:

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = I_{2r}^s - I_{1r}^s + (S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1}) + \varepsilon_{P21}. \quad (5.24)$$

Porém:

$$I_{2r}^s - I_{1r}^s = 40,3 \text{ TEC}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} = I_{1r}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}. \quad (5.25)$$

Assim:

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = I_{1r}^s \frac{1}{F} + (S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1}) + \varepsilon_{P21}, \quad (5.26)$$

com:

$$F = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (5.27)$$

ou

$$F(P_{2r}^s - P_{1r}^s) = I_{1r}^s + F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})] + F \varepsilon_{P21}. \quad (5.28)$$

Esta equação é básica para cálculo da correção ionosférica (I_{1r}^s), baseada em medida da pseudodistância com receptores de dupla frequência. O erro sistemático ($F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})]$) é diferente para cada satélite (s) observado e constante durante certos períodos e para diferentes passagens do mesmo satélite (Georgiadiou, 1994).

5.4.2 Correção Ionosférica, a partir das Medidas da Fase da Portadora

As equações de observações simplificadas para as fases das portadoras, em ambas as frequências, são dadas por:

$$\lambda_1 \phi_{1r}^s = \rho_r^s - I_{1r}^s + \lambda_1 N_{1r}^s + S_{\phi 1}^s + R_{\phi 1} + \varepsilon_{\phi 1}, \quad (5.29)$$

$$\lambda_2 \phi_{2r}^s = \rho_r^s - I_{2r}^s + \lambda_2 N_{2r}^s + S_{\phi 2}^s + R_{\phi 2} + \varepsilon_{\phi 2}.$$

De maneira análoga à derivação anterior, tem-se que:

$$F(\lambda_1 \phi_{1r}^s - \lambda_2 \phi_{2r}^s) = I_{1r}^s - F[(\lambda_2 N_{2r}^s - \lambda_1 N_{1r}^s) + (S_{\phi 2}^s - S_{\phi 1}^s) + (R_{\phi 2} - R_{\phi 1})] + F \varepsilon_{\phi 21}. \quad (5.30)$$

Nesta equação, o segundo termo do lado direito representa a soma da diferença entre as ambigüidades e o erro sistemático satélite/receptor. Este termo é

diferente para cada passagem do satélite e para cada vez que ocorrerem perdas de ciclos (Georgiadiou, 1994).

O erro sistemático, devido à ionosfera, estimado, a partir da fase da portadora, proporciona melhor precisão que os obtidos com a pseudodistância (Newby et al., 1990). Contudo, no ajustamento, o número de incógnitas é maior, devido às ambigüidades e às perdas de ciclos.

5.4.3 Modelo para Calcular a Correção da Refração Ionosférica

Alguns autores têm estudado o TEC da ionosfera, levando em consideração as tendências diferenciais dos instrumentos, a partir de observações GPS obtidas nas duas frequências, utilizando uma ou várias estações GPS.

Lanyi e Roth (1988) basearam seus estudos, a partir de dados de uma estação GPS, coletados durante a noite. Coco et al. (1991) também utilizaram o mesmo procedimento. Ambos representam o TEC vertical, por meio de um polinômio. Wilson et al., em 1992, citado por Sardon et al. (1994), modelam o TEC vertical, por meio de harmônicos esféricos, utilizando dados de receptores GPS, coletados durante 24 horas, em uma rede global. Sardon et al. (1994) também apresentam um modelo, para estimar o TEC e as tendências instrumentais, a partir de dados de uma rede GPS. Neste trabalho, o TEC é modelado, por meio de um polinômio, com dados coletados durante 48 horas.

Georgiadiou (1994), ao contrário dos outros pesquisadores, modela, diretamente, o atraso vertical, devido à ionosfera, na portadora L_1 (I_1^V), a partir de

uma série. Em seu experimento, tal série mostrou-se adequada, para representar o comportamento diário do atraso vertical.

O modelo desenvolvido por Georgiadiou (1994), de escala regional, testado com dados GPS para a área coberta pelo Sistema Ativo de Referência GPS (AGRS) da Holanda, é uma modificação do modelo desenvolvido, originalmente, por Georgiadiou e Kleusberg, em 1988, para calcular o atraso ionosférico ao longo do caminho do satélite/receptor:

$$I_{1r}^s = \frac{I_1^v}{\cos(z'^s)} . \quad (5.31)$$

onde z'^s representa o ângulo zenital do satélite (s), no ponto ionosférico IP (figura 2.3), para uma simples camada ionosférica de altitude h_m igual a 400 km.

Substituindo a equação (5.31) na (5.28), tem-se:

$$F(P_{2r}^s - P_{1r}^s) = \frac{I_1^v}{\cos(z'^s)} + F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})] + F \varepsilon_{p21} . \quad (5.32)$$

O termo do lado esquerdo desta equação representa o erro sistemático na portadora L_1 , devido à ionosfera, hardware do satélite e do receptor, obtido, através das medidas das pseudodistâncias em ambas as frequências. Esta equação pode ser reescrita como:

$$F(P_{2r}^s - P_{1r}^s) = \frac{I_1^v}{\cos(z'^s)} + C^s + F \varepsilon_{p21}, \quad (5.33)$$

com:

$$C^s = F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})]. \quad (5.34)$$

representando o termo da tendência diferencial do equipamento satélite/receptor.

De forma análoga, a partir da equação (5.30), pode-se escrever para a fase da portadora:

$$F(\lambda_1 \phi_{1r}^s - \lambda_2 \phi_{2r}^s) = \frac{I_1^v}{\cos(z'^s)} - F[(\lambda_2 N_2^s - \lambda_1 N_1^s) + (S_{\phi 2}^s - S_{\phi 1}^s) + (R_{\phi 2} - R_{\phi 1})] + F \varepsilon_{\phi 21}. \quad (5.35)$$

O termo do lado esquerdo desta equação representa o erro sistemático em L_1 , a partir das medidas das fases da portadora com receptores GPS de dupla frequência e pode ser reescrita como:

$$F(\lambda_1 \phi_{1r}^s - \lambda_2 \phi_{2r}^s) = \frac{I_1^v}{\cos(z'^s)} + D^s + F \varepsilon_{\phi 21}, \quad (5.36)$$

com:

$$D^s = -F[(\lambda_2 N_2^s - \lambda_1 N_1^s) + (S_{\phi 2}^s - S_{\phi 1}^s) + (R_{\phi 2} - R_{\phi 1})], \quad (5.37)$$

onde D^s representa a soma da diferença da ambigüidade com as tendências diferenciais do hardware dos satélites/receptor.

Para modelar a correção ionosférica na direção da vertical, Georgiadiou (1994), devido à natureza periódica do efeito, utilizou a seguinte série:

$$\begin{aligned} I_1^v = & a_1 + a_2 B^s + a_3 \cos(h^s) + a_4 \sin(h^s) + a_5 \cos(2h^s) + a_6 \sin(2h^s) + \\ & a_7 \cos(3h^s) + a_8 \sin(3h^s) + a_9 \cos(4h^s) + a_{10} \sin(4h^s) + \\ & a_{11} \cos(5h^s) + a_{12} \sin(5h^s) + a_{13} \cos(6h^s) + a_{14} \sin(6h^s) + a_{15} B^s h^s. \end{aligned} \quad (5.38)$$

A variável B^s representa a diferença entre a latitude do receptor e a do ponto sub-ionosférico (projeção da latitude do ponto ionosférico, na camada ionosférica de altitude média h_m , sobre a superfície da Terra). A variável h^s é dada por:

$$h^s = \frac{2\pi}{T}(t - 14^h), \quad (5.39)$$

onde T representa o período de 24 horas e t a hora local do ponto sub-ionosférico, ambos em horas.

Então, substituindo-se a série dada pela equação (5.38), que representa o atraso vertical, na equação (5.33) ou (5.36), podem-se estimar os coeficientes que permitem calcular o efeito da refração ionosférica. Quando se utilizam

pseudodistâncias, para modelar o atraso ionosférico, tem-se um total de $15+s$ incógnitas, onde as 15 primeiras incógnitas representam os coeficientes da série $(a_1, a_2, \dots, a_{15})$ e as demais os coeficientes de C^s , num total igual ao número (s) de satélites observados. Um sistema de equações envolvendo todos os satélites observados, em um número de épocas suficiente, permite estimar os coeficientes do modelo, num ajustamento pelo MMQ. Quando vários satélites, em diversas horas, são observados, é possível separar a tendência diferencial do equipamento (C^s) e o atraso ionosférico vertical (I_1^V), pois o atraso ionosférico vertical depende do ângulo z' de incidência do grupo (Georgiadiou, 1994).

Quando a fase da portadora for utilizada para o cálculo da correção ionosférica, o número de parâmetros incógnitos será igual a $15+m$. Neste caso, m representa as incógnitas referente a D^s , que reflete o número de passagens dos satélites e perdas de ciclos. Por passagens dos satélites, subentende-se que é o período em que estão sendo rastreados. As perdas de ciclos podem ou não ocorrer durante o rastreo e, toda vez que ocorrer uma perda de ciclo, uma nova incógnita é introduzida. Da mesma forma, ocorre com a passagem do satélite.

6 MODELO IONOSFÉRICO

Dentre os vários modelos apresentados no capítulo 5, após análise de suas potencialidades e deficiências, decidiu-se trabalhar com o apresentado por Georgiadiou (1994), introduzindo algumas modificações. Portanto, o modelo a ser apresentado é uma modificação do modelo aplicado na área coberta pelo Sistema Ativo de Referência GPS (AGRS) da Holanda. Os resultados desse modelo mostraram-se adequados, para representar a conduta diária do efeito vertical da ionosfera.

A modificação consistiu na separação das tendências dos equipamentos (receptores e satélites), quando se têm, como observáveis, as pseudodistâncias. No experimento conduzido na Holanda, isto não foi possível, pois se utilizou somente uma estação (receptor), para estimar os parâmetros. Dessa forma, com os dados da RBMC, a modificação proposta é possível.

6.1 Modelo Ionosférico para Pseudodistância

No modelo de Georgiadiou, (eq. 5.33), os parâmetros incógnitos do modelo são os coeficientes da série ($a_1, a_2, a_3, \dots, a_{15}$) e os coeficientes C^s , sendo s o número de satélites rastreados. Considerando que, agora, se tem um conjunto de receptores (r) para a determinação dos parâmetros, é possível, então, separarem-se as diferenças instrumentais em L_1 , isto é, os erros sistemáticos dos receptores e dos satélites, designados, respectivamente, de erros sistemáticos ou tendências, interfrequência, dos receptores e dos satélites. A tendência interfrequência do

satélite, quando é expressa em unidades de tempo (ns), é conhecida, também, como T_{GD} (*Differential Group Delay*). Assim, pode-se escrever, novamente, o modelo (eq. 5.32) como:

$$F(P_2^s - P_1^s)_r = \frac{I_1^v}{\cos(Z^s)_r} + F(R_{p2} - R_{p1})_r + F(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + F_{\varepsilon_{p21}}, \quad (6.1)$$

sendo a correção, devido à ionosfera na direção vertical (I_1^v), modelada pela série dada em (5.38).

Desta forma, o número total de parâmetros passa a ser $15+r+s$, onde os 15 primeiros representam os coeficientes da série, r corresponde aos erros sistemáticos, devido aos receptores $(R_{p2} - R_{p1})_r$, num total igual ao número de receptores utilizados na rede e s corresponde aos erros sistemáticos dos satélites $(S_{p2}^s - S_{p1}^s)$, num total igual ao número de satélites rastreados para determinação dos parâmetros do modelo.

As matrizes e vetores envolvidos no ajustamento podem ser montadas, a partir do seguinte modelo:

$$F(P_2^s - P_1^s)_r = SF_r^s (a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^6 \{a_j \cos(ih^s) + a_{j+1} \sin(ih^s)\} + a_{15} B^s h^s) + \\ F(R_{p2} - R_{p1})_r + F(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + F_{\varepsilon_{p21}}. \quad (6.2)$$

A matriz A , que será formada pelos coeficientes dos parâmetros, é

constituída de n linhas e $15+r+s$ colunas, onde n representa o número de observações de pseudodistâncias, derivadas de L_1 e L_2 simultaneamente.

Considerando-se apenas uma época, para efeito de se mostrar o padrão da matriz

A para cada um dos r receptores e s satélites envolvidos, tem-se que:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{15} & r_1 & r_2 & \dots & r_r & s_1 & s_2 & \dots & s_s \end{matrix} \\ \left. \begin{matrix} r_1 \\ \vdots \\ r_2 \\ \vdots \\ r_r \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1}B^{S1}h^{S1} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2}B^{S2}h^{S2} & F & 0 & \dots & 0 & 0 & F & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss}B^{Ss}h^{Ss} & F & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & F \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1}B^{S1}h^{S1} & 0 & F & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2}B^{S2}h^{S2} & 0 & F & \dots & 0 & 0 & F & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss}B^{Ss}h^{Ss} & 0 & F & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & F \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1}B^{S1}h^{S1} & 0 & 0 & \dots & F & F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2}B^{S2}h^{S2} & 0 & 0 & \dots & F & 0 & F & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss}B^{Ss}h^{Ss} & 0 & 0 & \dots & F & 0 & 0 & \dots & F \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(6.3)

O vetor L será igual ao vetor das observações L_b , que é composto da combinação linear das observáveis de mesmo tipo, de dimensão $n \times 1$. Para os diversos receptores e satélites, considerando-se apenas uma época, tem-se que:

$$L_b = \begin{bmatrix} F(P_2^{S1} - P_1^{S1})_{r_1} \\ F(P_2^{S2} - P_1^{S2})_{r_1} \\ \vdots \\ F(P_2^{Ss} - P_1^{Ss})_{r_1} \\ \vdots \\ F(P_2^{S1} - P_1^{S1})_{r_2} \\ F(P_2^{S2} - P_1^{S2})_{r_2} \\ \vdots \\ F(P_2^{Ss} - P_1^{Ss})_{r_2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ F(P_2^{S1} - P_1^{S1})_{r_r} \\ F(P_2^{S2} - P_1^{S2})_{r_r} \\ \vdots \\ F(P_2^{Ss} - P_1^{Ss})_{r_r} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

A matriz variância-covariância do vetor L_b é composta das variâncias advindas da propagação de covariância aplicada na combinação linear, dada por:

$$I_b = F(P_2^s - P_1^s). \quad (6.5)$$

Considerando que a combinação linear das observações são independentes, a MVC resultante será diagonal. Tomando-se como desvios padrão para as pseudodistâncias (C/A e P_2), respectivamente, os valores 1 m e 1,5 m, resultarão, após a propagação, que:

$$\sigma_{L_b} = F \cdot 1,80 \text{ m}, \quad (6.6)$$

onde F (eq. 5.27) é uma constante igual a $F = f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \cong 1,546$.

Para o valor do desvio padrão da pseudodistância, derivada do código C/A, considerou-se apenas o ruído do receptor, que é de aproximadamente 1 m (Langley, 1997). Os receptores que utilizam a técnica correlação cruzada para o processamento do sinal apresentam uma correlação positiva entre as portadoras L_1 e L_2 . Tiberius et al. (1999), em seus experimentos, incluindo, também, os receptores que não se utilizam dessa técnica, para acessar a portadora L_2 , determinaram os valores para os coeficientes de correlação entre as portadoras, que variam de 0,3 a 0,7 para diferentes receptores. No presente trabalho, adotou-se para o desvio padrão da pseudodistância, obtida com L_2 , o valor que corresponde a 1,5 vezes o desvio da pseudodistância, derivada do código C/A. O valor dessa constante foi obtida com base na precisão empírica, apresentado por Tiberius et al. (1999), num de seus experimentos em que o receptor emprega a técnica de correlação cruzada. Os receptores Trimble 4000 SSI da RBMC, empregam essa mesma técnica. Neste caso, proporcionou-se um desvio padrão igual a 1,5 m para a pseudodistância derivada da portadora L_2 .

Se o produto da matriz A , por um vetor B qualquer, não nulo, resultar numa matriz nula, a matriz A apresenta deficiência de característica ($AB=0$, para $B \neq 0$) (Strang e Borre, 1997); e a matriz N , resultante do produto $A^T P A$, será singular. Como exemplo, toma-se o vetor não nulo B .

$$B = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{15} & r_1 & r_2 & \dots & r_r & s_1 & s_2 & \dots & s_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & -1 & -1 & \dots & -1 \end{bmatrix}^T, \quad (6.7)$$

resulta que:

$$\begin{aligned}
 AB = & \begin{bmatrix}
 SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1}B^{S1}h^{S1} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\
 SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2}B^{S2}h^{S2} & F & 0 & \dots & 0 & 0 & F & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss}B^{Ss}h^{Ss} & F & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & F \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1}B^{S1}h^{S1} & 0 & F & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\
 SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2}B^{S2}h^{S2} & 0 & F & \dots & 0 & 0 & F & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss}B^{Ss}h^{Ss} & 0 & F & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & F \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1}B^{S1}h^{S1} & 0 & 0 & \dots & F & F & 0 & \dots & 0 \\
 SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2}B^{S2}h^{S2} & 0 & 0 & \dots & F & 0 & F & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss}B^{Ss}h^{Ss} & 0 & 0 & \dots & F & 0 & 0 & \dots & F \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 1 \\
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 -1
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{6.8}$$

Então o modelo apresenta deficiência de característica. E, conforme dito, a matriz N, neste caso, será singular. A sua singularidade será eliminada, com a introdução de um número de injunções igual ao número de deficiências de característica da matriz, que, no caso, é 1 (uma). Isto implica que a tendência interfrequência dos receptores ou dos satélites tem que ser determinada em relação a um deles.

A injunção pode ser introduzida, com respeito às tendências, num dos receptores ou num dos satélites. Se a injunção for imposta no receptor (r_i), a matriz C (equação (3.20)), de dimensão $(15+r+s \times 1)$ terá o seguinte formato:

$$C = \begin{bmatrix}
 a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{15} & r_1 & \dots & r_i & \dots & r_r & s_1 & s_2 & \dots & s_s \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0
 \end{bmatrix}
 \tag{6.9}$$

Um valor terá que ser atribuído ao erro sistemático $(R_{p2} - R_{p1})_{r_i}$ do receptor (r_i), bem como uma variância ou desvio padrão para a injunção.

6.2 Modelo Ionosférico para Pseudodistância Filtrada pela Fase da Portadora

O modelo utilizado é o mesmo da pseudodistância, porém as observáveis são filtradas, pela fase da portadora. As matrizes e vetores envolvidos no ajustamento têm o mesmo padrão. O vetor das observações, neste caso, é composto da combinação linear das pseudodistâncias filtradas pela fase. E a sua MVC é montada, a partir dos desvios padrão das pseudodistâncias filtradas pelas fases das portadoras (eq. 4.43), utilizando-se da seguinte expressão:

$$\sigma_{L_b} = F \sqrt{\frac{\sigma_{P_2}^2 (\sigma_{P_2}^2 + k_2 \sigma_{\phi_2}^2)}{k_2 (\sigma_{P_2}^2 + \sigma_{\phi_2}^2)} + \frac{\sigma_{P_1}^2 (\sigma_{P_1}^2 + k_1 \sigma_{\phi_1}^2)}{k_1 (\sigma_{P_1}^2 + \sigma_{\phi_1}^2)}}, \quad (6.10)$$

A figura 6.1 mostra a precisão para a pseudodistância (C/A, P₂), obtida com a equação (4.43), com $\sigma_{P_1} = 1,0$ m, $\sigma_{P_2} = 1,5$ m, $\sigma_{\phi_1} = 0,003$ m e $\sigma_{\phi_2} = 0,0039$ m, para $k_i = 1, 2, \dots, t_k$, com $i = 1, 2$.

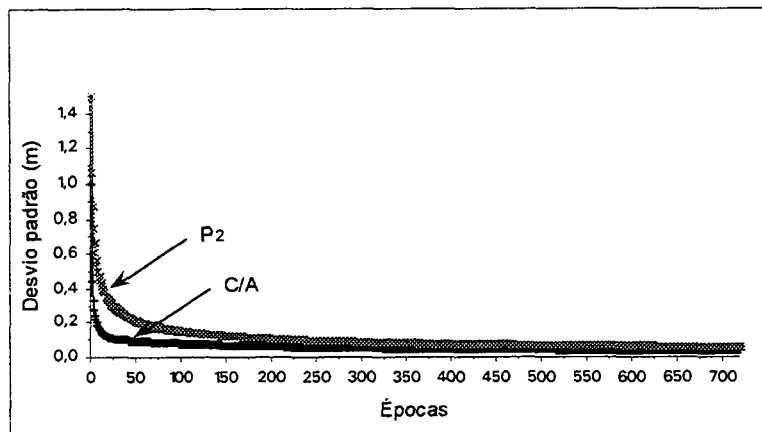


Figura 6.1 – Desvio padrão das pseudodistâncias

6.3 Modelo Ionosférico para Fase da Portadora

No modelo de Georgiadiou (eq. 5.36) os parâmetros incógnitos do modelo são os coeficientes da série ($a_1, a_2, a_3, \dots, a_{15}$) e os coeficientes D^s , que refletem o número m de passagens e perdas de ciclos dos satélites observados. Neste modelo, para um conjunto de receptores (r), não é possível separar os erros sistemáticos interfrequências dos receptores ou dos satélites das diferenças de ambigüidades.

A separação entre as tendências interfrequências dos receptores ou dos satélites das ambigüidades implica na introdução de uma deficiência de característica para cada receptor ou satélite. Isto seria resolvido no ajustamento, através da introdução de injunções relativas dos valores dos erros sistemáticos dos receptores $(R_{\phi 2} - R_{\phi 1})_r$ ou satélites $(S_{\phi 2}^s - S_{\phi 1}^s)$. No entanto, os valores absolutos das tendências interfrequências dos receptores da RBMC não são conhecidos; e as dos satélites, até abril de 1999, não eram adequadamente estimados (Hill et al., 1999). O mesmo tipo de problema ocorre, na tentativa de se separarem as diferenças das ambigüidades das demais, que resulta numa deficiência de característica, cada vez que ocorrer uma passagem do satélite ou perdas de ciclos. Desta forma não é possível separar as diferenças, a não ser que se tenha conhecimento prévio do seu valor. Os valores do erros sistemáticos, ou seja, as tendências interfrequências dos satélites calibrados antes dos lançamentos mostram pouca concordância com os valores estimados (Coco, 1991).

A partir do modelo:

$$F(\lambda_2 \phi_2^s - \lambda_1 \phi_1^s)_r = SF_r^s (a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^6 \{a_j \cos(ih^s) + a_{j+1} \sin(ih^s)\} + a_{15} B^{sh^s}) - \\ F[(\lambda_2 N_2^s - \lambda_1 N_1^s) + (S_{\phi 2}^s - S_{\phi 1}^s) + (R_{\phi 2} - R_{\phi 1})_r] + F \varepsilon_{\phi 21}, \quad (6.11)$$

pode-se obter o padrão da matriz A, formado pelos coeficientes dos parâmetros, constituída de n linhas por 15+m colunas. A cada passagem ou perdas de ciclos de um satélite, implica em um novo parâmetro.

$$A = \begin{matrix} & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{15} & m_1 & m_2 & \dots & m_m \\ \left. \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \end{matrix} \right\} & \begin{bmatrix} SF^{s1} & SF^{s1}B^{s1} & SF^{s1}\cosh^{s1} & SF^{s1}\sinh^{s1} & \dots & SF^{s1}B^{s1}h^{s1} & -F & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ SF^{s2} & SF^{s2}B^{s2} & SF^{s2}\cosh^{s2} & SF^{s2}\sinh^{s2} & \dots & SF^{s2}B^{s2}h^{s2} & 0 & -F & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ SF^{ss} & SF^{ss}B^{ss} & SF^{ss}\cosh^{ss} & SF^{ss}\sinh^{ss} & \dots & SF^{ss}B^{ss}h^{ss} & 0 & 0 & \dots & -F & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ SF^{s1} & SF^{s1}B^{s1} & SF^{s1}\cosh^{s1} & SF^{s1}\sinh^{s1} & \dots & SF^{s1}B^{s1}h^{s1} & 0 & 0 & \dots & 0 & -F & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ SF^{s2} & SF^{s2}B^{s2} & SF^{s2}\cosh^{s2} & SF^{s2}\sinh^{s2} & \dots & SF^{s2}B^{s2}h^{s2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -F & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ SF^{ss} & SF^{ss}B^{ss} & SF^{ss}\cosh^{ss} & SF^{ss}\sinh^{ss} & \dots & SF^{ss}B^{ss}h^{ss} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -F & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \end{matrix} \right\} & \begin{bmatrix} SF^{s1} & SF^{s1}B^{s1} & SF^{s1}\cosh^{s1} & SF^{s1}\sinh^{s1} & \dots & SF^{s1}B^{s1}h^{s1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & -F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{s2} & SF^{s2}B^{s2} & SF^{s2}\cosh^{s2} & SF^{s2}\sinh^{s2} & \dots & SF^{s2}B^{s2}h^{s2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -F & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ SF^{ss} & SF^{ss}B^{ss} & SF^{ss}\cosh^{ss} & SF^{ss}\sinh^{ss} & \dots & SF^{ss}B^{ss}h^{ss} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -F \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.12)$$

O vetor das observações L_b ($n \times 1$) será composto da combinação linear das observáveis da fase da portadora, dada por:

$$l_b = F(\lambda_1 \phi_1^s - \lambda_2 \phi_2^s)_r. \quad (6.13)$$

A matriz variância-covariância do vetor L_b é composta das variâncias advindas da propagação aplicada na combinação linear acima. Considerando-se que a fase das portadoras tem desvios padrão, respectivamente iguais à 0,0030 m e 0,0039 m para as frequências f_1 e f_2 , resultará, após a propagação de covariância que:

$$\sigma_b = F \ 0,0194 \text{ m.} \quad (6.14)$$

6.4 Análise dos Parâmetros do Modelo

Com o objetivo de analisar o comportamento dos parâmetros do modelo, um conjunto de dados das estações da RBMC, disponibilizados pelo IBGE, foram utilizados. Esses dados, em formato RINEX, foram coletados durante quatro meses do ano de 1998 e abrangem as quatro estações do ano. Foram coletados, utilizando receptores de dupla frequência (Trimble 4000 SSI), durante 24 horas, a uma taxa de 15 segundos, exceto para a estação de Fortaleza (FORT), que utiliza 30 segundos como taxa de coleta e receptor Turbo Rouge SNR 800. Com esses dados, será possível verificar as variações sazonais provocadas por mudanças na densidade de elétrons que ocorrem devido, às estações do ano, principalmente pela mudança do ângulo zenital do Sol e intensidade do fluxo de ionização.

Os dados de entrada do modelo podem ser as pseudodistâncias (C/A e P_2), pseudodistâncias filtradas pelas fases das portadoras ou as próprias fases das

portadoras (ϕ_1 e ϕ_2).

Um programa em FORTRAN Lahey 95, cujo fluxograma se encontra anexo (anexo 01), foi elaborado, para estimar os parâmetros do modelo, que consistem nos coeficientes da série, das tendências interfrequências em L_1 dos receptores e satélites, ou das tendências em conjunto dos receptores, satélites e ambigüidades, para o caso, quando se utiliza a fase da portadora. Esses parâmetros são estimados, através do ajustamento pelo MMQ, utilizando-se o método das equações de observação (método paramétrico) com injunção. Controle de qualidade baseado no teste estatístico Qui-quadrado (χ^2) foi implementado, para a análise da qualidade do ajustamento, bem como o teste de significância dos parâmetros, com o objetivo de validar os parâmetros da série utilizada.

Nos experimentos realizados, para estimar os parâmetros do modelo, adotou-se o valor de 400 km para a altitude média da camada ionosférica, que representa o centróide da distribuição dos elétrons da ionosfera. Os dados GPS foram processados a cada 30 segundos, devido à taxa de coleta da estação FORT e com elevação maior ou igual a 15 graus. As observáveis utilizadas nesses testes foram as pseudodistâncias, pseudodistâncias filtradas pela fase das portadoras e as fases das portadoras.

As estações da RBMC utilizadas na estimativa dos parâmetros do modelo estão relacionadas na tabela 6.2. A estação UEPP foi tomada como referência, através da injunção relativa, para estimar os parâmetros. Algumas estações não participaram do ajustamento, devido a problemas nos arquivos de dados, tais como erro de leitura ou arquivos incompletos. Alguns satélites também deixaram de participar em determinados dias, por estarem em manutenção, para mudança do

oscilador que produz a frequência padrão operacional ou reposicionamento. As informações de manutenção podem ser obtidas via internet, no seguinte endereço:
<http://www.navcen.uscg.mil>.

Tabela 6.1 - Estações utilizadas na estimativa dos parâmetros

ESTAÇÕES RBMC	DIAS DO ANO	
	001..... JANEIRO (VERÃO).....031	091..... ABRIL (OUTONO).....120
BOMJ		XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
BRAZ		
CUIB	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
PARA	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
VICO	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
FORT	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	X XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
IMPZ		XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
MANA	XXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXX
UEPP	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
	182 JULHO (INVERNO)..... 212	274 OUTUBRO (PRIMAVERA).....303
BOMJ	XXXXXXXXXXXXXXXXXX	XX X
BRAZ	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
CUIB	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
PARA	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
VICO	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXX X X XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
FORT	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX	XX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXX
IMPZ	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
MANA	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XX
UEPP	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Adotou-se, como critério para rejeição das observáveis, o padrão, que representa o limite superior de mudança do TEC para usuários estáticos, dada por $0,1 \times 10^{16}$ (el/m²) por segundos (Klobuchar, 1996). Esse valor representa 0,085 Hz em L₁, e corresponde à 0,0163 m/s de mudança nas pseudodistâncias, devido ao efeito da ionosfera. As diferenças entre combinações lineares consecutivas maiores do que 0,0163 m/s implicam na rejeição das observáveis utilizadas, para estimar os parâmetros do modelo.

Para remover o efeito sistemático em L₁ da estação de referência, calcula-se a média das tendências interfrequências dos satélites ($\langle F(S_{P_2}^s - S_{P_1}^s) \rangle$) e subtrai-se do valor individual da tendência de cada satélite, diariamente, pois a variação média reflete a variação da estação de referência (Sardon e Zarraoa, 1997). A tendência interfrequência de cada satélite relativa à média será dada por:

$$F(S_{P_2}^s - S_{P_1}^s)^m = F(S_{P_2}^s - S_{P_1}^s) - \langle F(S_{P_2}^s - S_{P_1}^s) \rangle . \quad (6.15)$$

Dessa forma, as tendências interfrequência em L₁, devido aos receptores, relativa à média, é calculada como:

$$F(R_{P_2} - R_{P_1})_r^m = F(R_{P_2} - R_{P_1})_r - \langle F(S_{P_2}^s - S_{P_1}^s) \rangle . \quad (6.16)$$

Esse procedimento, segundo Sardon e Zarraoa (1997), remove o efeito da tendência interfrequência da estação de referência, mas não possibilita obter a tendência interfrequência absoluta dos satélites e nem dos receptores em L₁. Os

valores absolutos dos erros sistemáticos dos satélites, na portadora L_1 , são transmitidos nas mensagens de navegação. Desde de abril de 1999, esses valores são estimados pelo JPL, uma vez que os valores fornecidos pelo fabricante não eram determinados apropriadamente, portanto não adequados para o uso (Wilson et al., 1999).

As figuras 6.2, 6.3 e 6.4, respectivamente, apresentam os coeficientes estimados para a série do modelo, o erro sistemático em L_1 , devido aos receptores (equação (6.16)) e aos satélites (equação (6.15)). Esses gráficos foram obtidos, a partir dos resultados do ajustamento, utilizando-se, como observável, a pseudodistância. O resultado do ajustamento com a pseudodistância filtrada foi o que apresentou melhor precisão para os parâmetros estimados. Vale salientar que, quando se utiliza a fase da portadora, somente os coeficientes apresentam menores desvios padrão. A escala é a mesma para todos os gráficos do mesmo tipo de parâmetros.

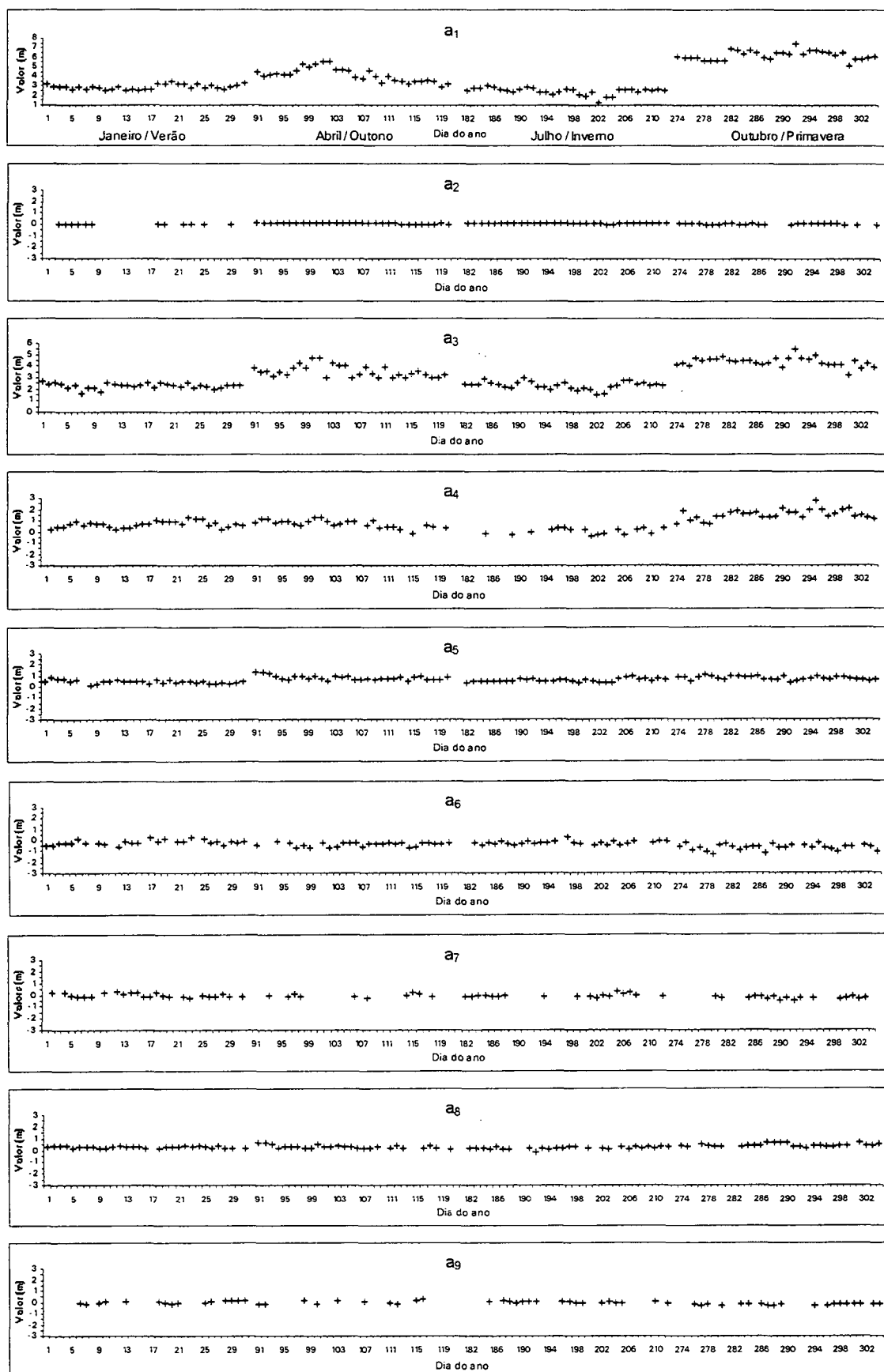


Figura 6.2 – Coeficientes da série - Pseudodistância

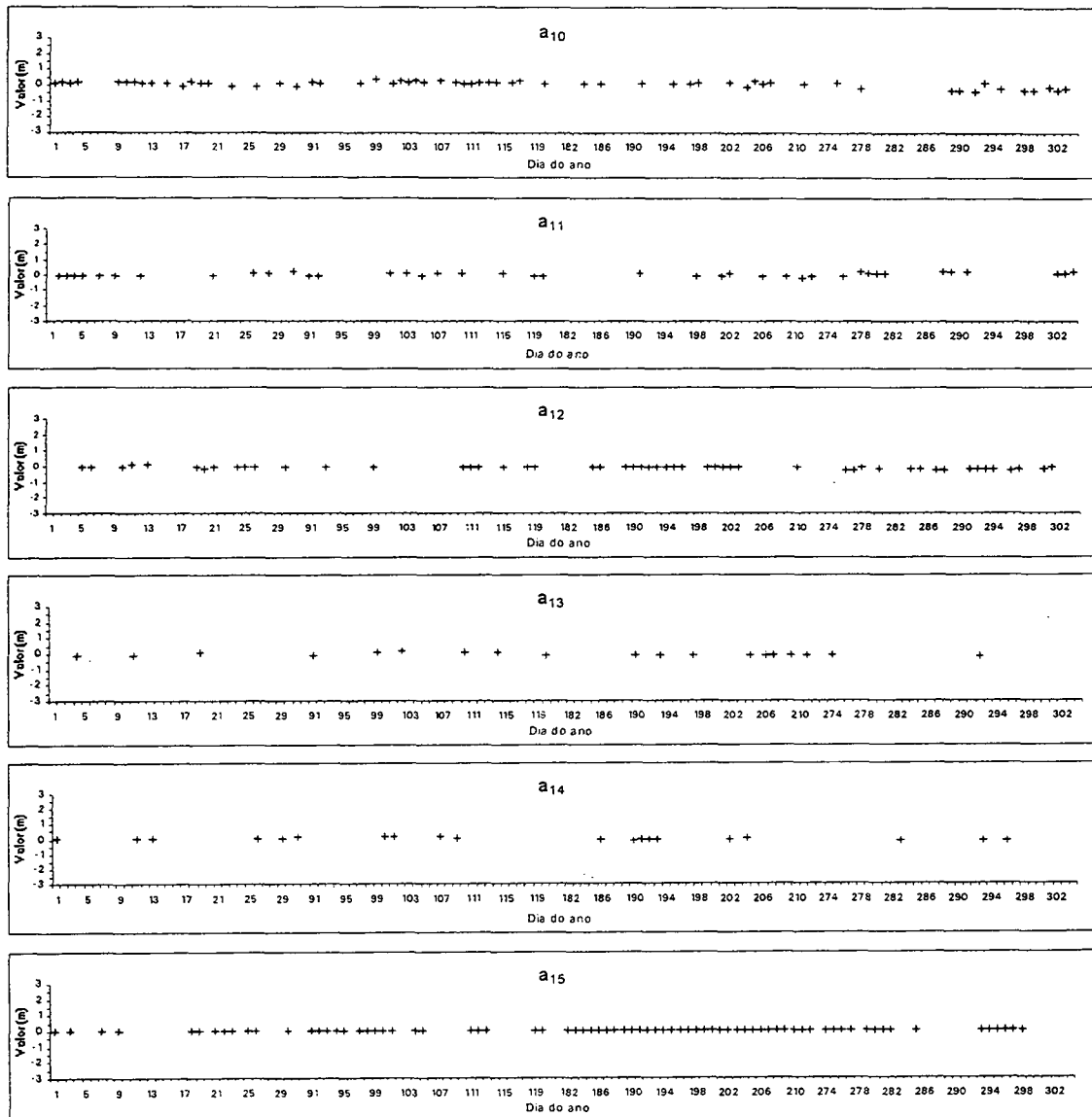


Figura 6.2 – Coeficientes da série – Pseudodistância (continuação)

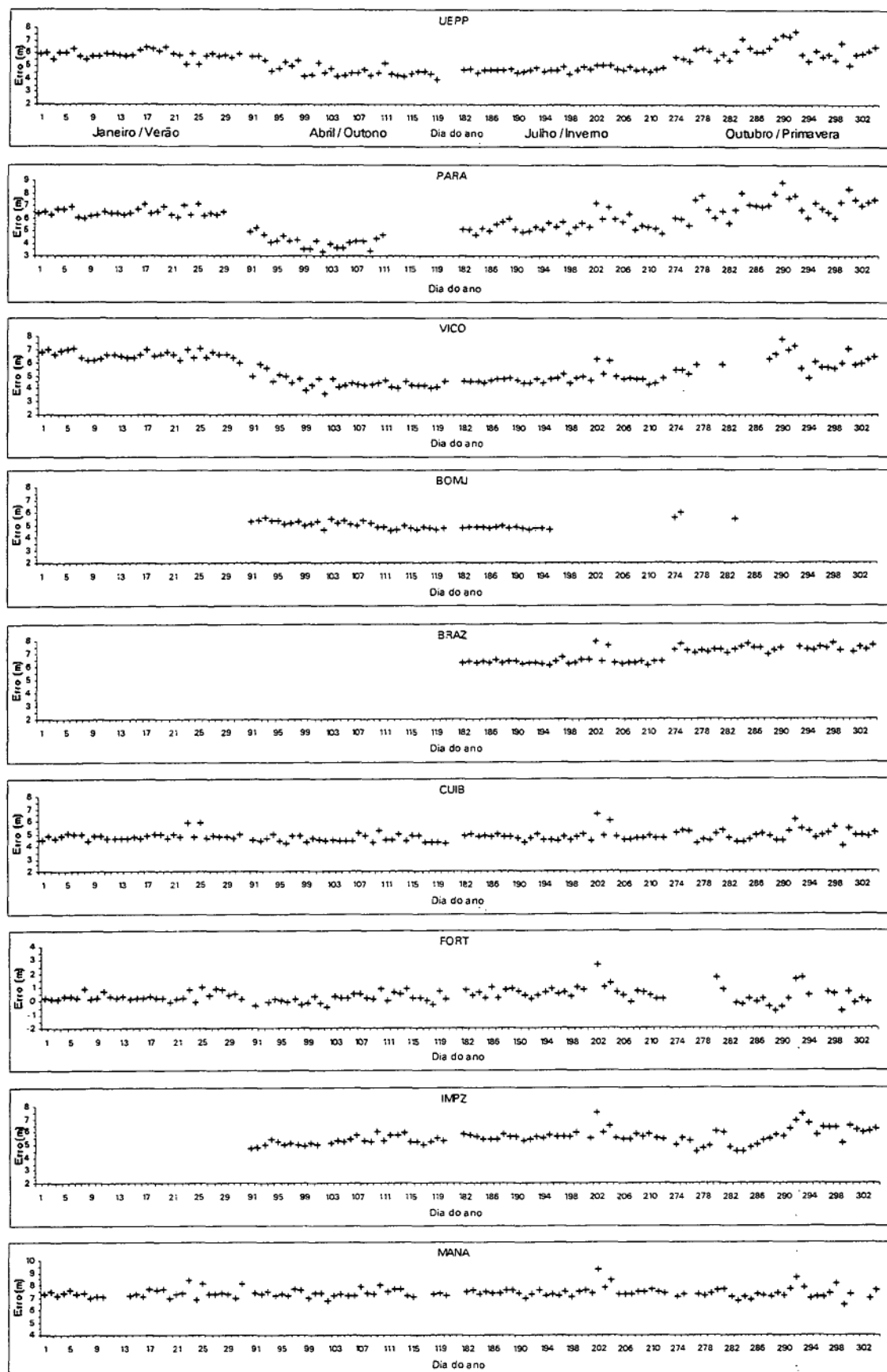


Figura 6.3 – Erro sistemático em L_1 , para os receptores – Pseudodistância

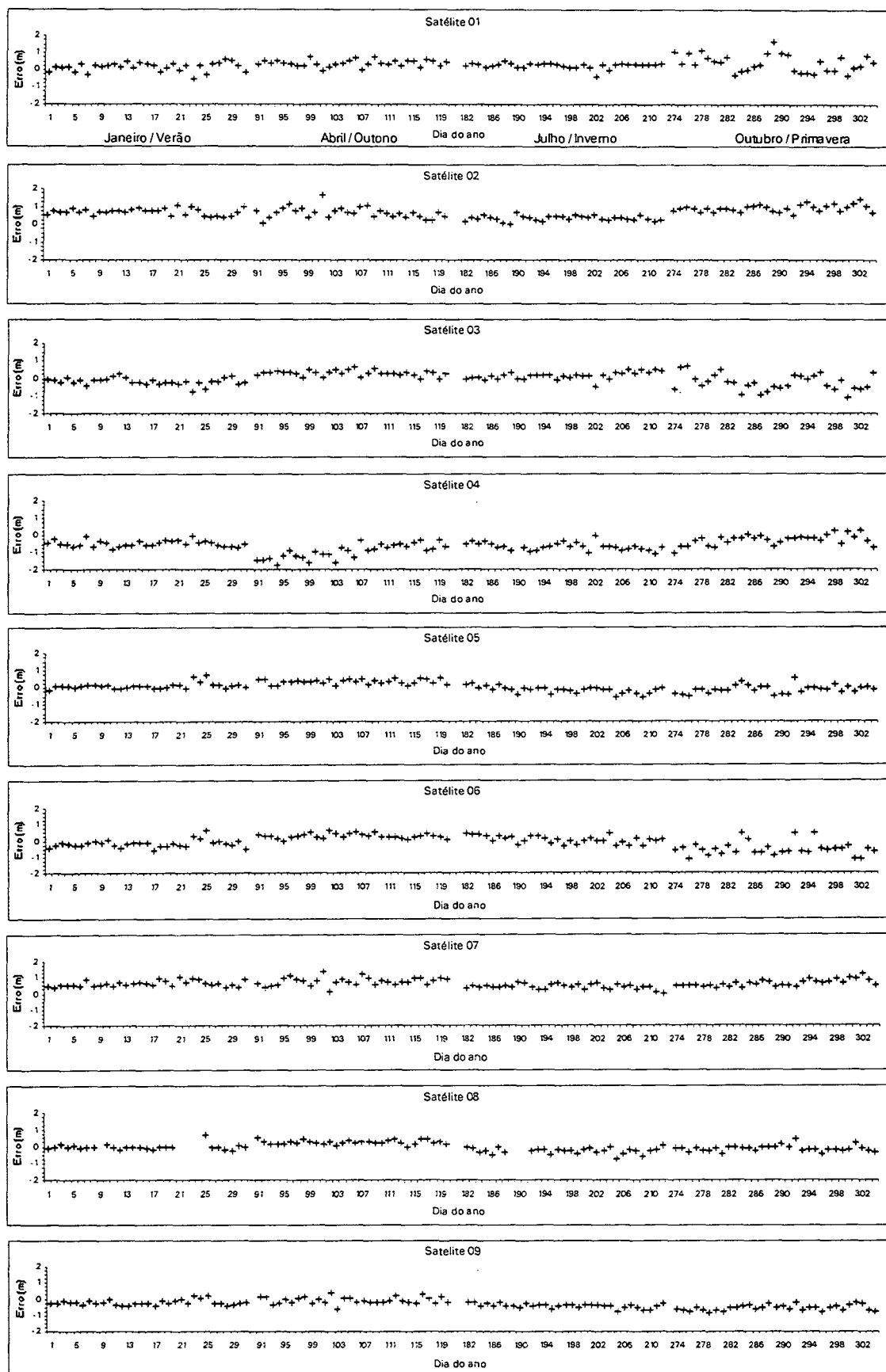


Figura 6.4 – Erro sistemático em L_1 , para os satélites – Pseudodistância

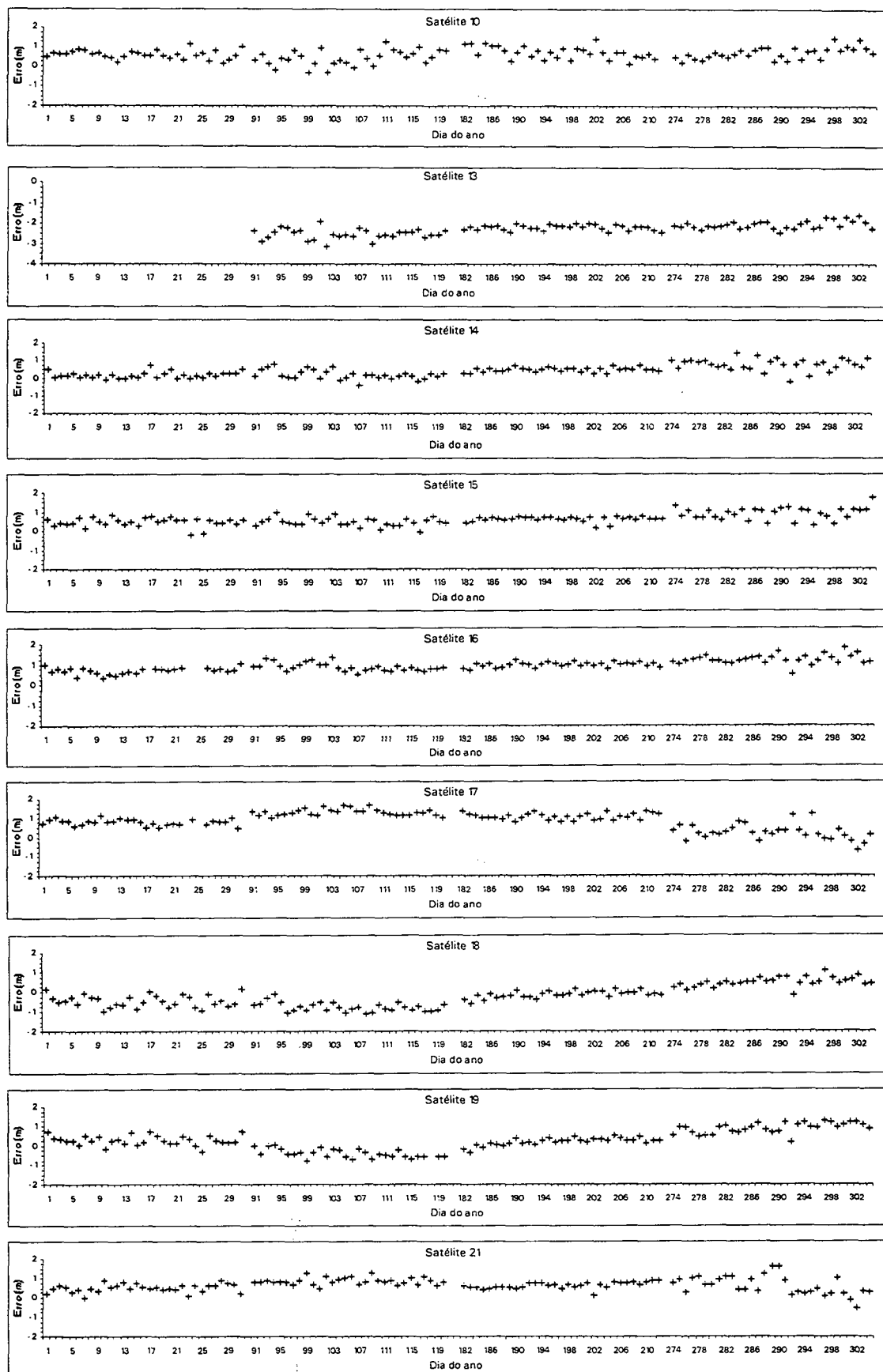


Figura 6.4 – Erro sistemático em L_1 , para os satélites – Pseudodistância (continuação)

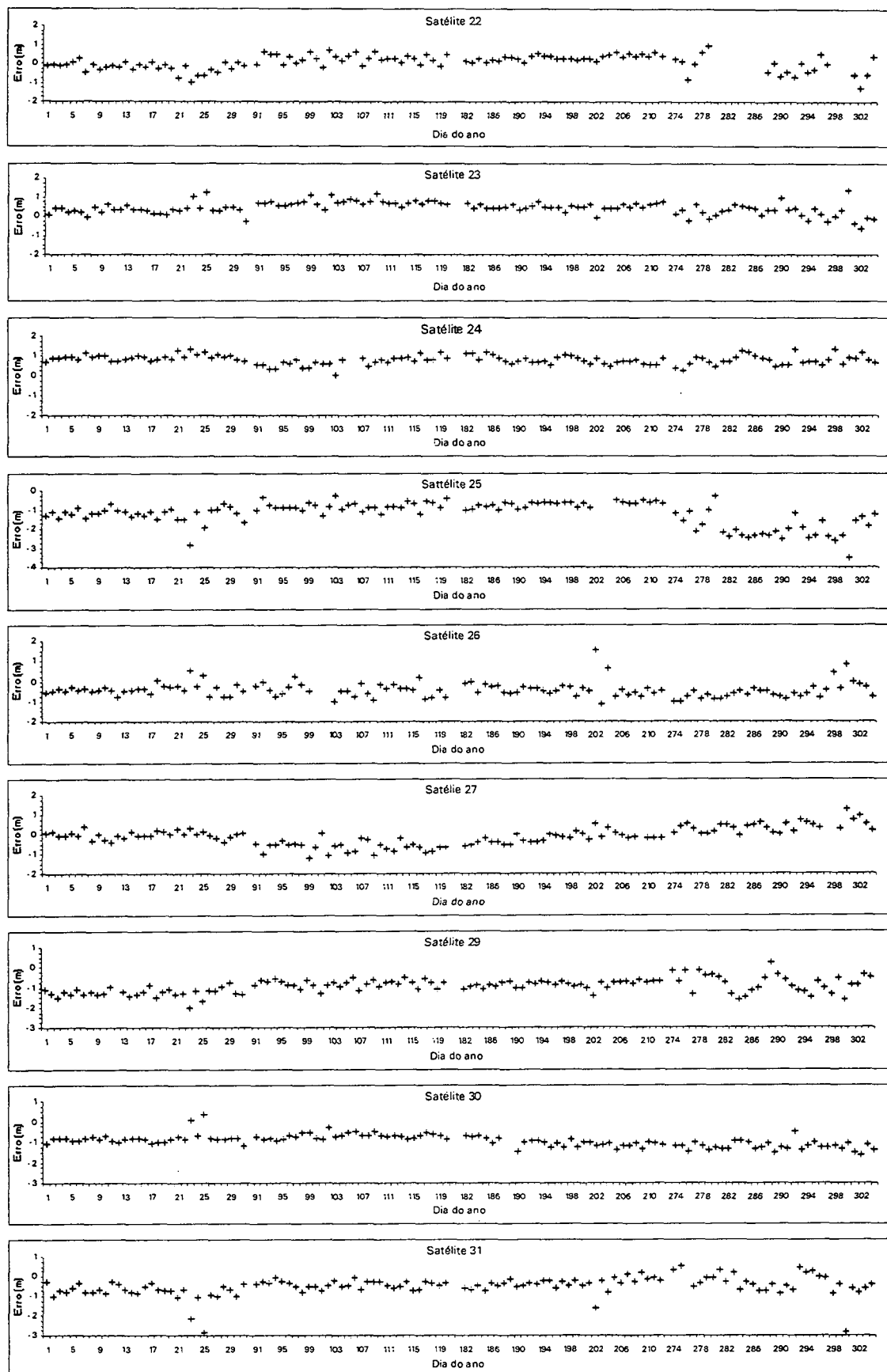


Figura 6.4 – Erro sistemático em L_1 , para os satélites – Pseudodistância (continuação)

Os gráficos apresentados nas figuras 6.2, 6.3 e 6.4 mostram os valores dos parâmetros estimados, a partir da pseudodistância. Os coeficientes estimados para a série, utilizando-se da pseudodistância filtrada pela fase da portadora ou da fase da portadora, apresentam comportamento similar aos apresentados, porém os desvios padrão são menores.

Os coeficientes, principalmente a_1 e a_3 , apresentados na figura 6.2, mostram o comportamento sazonal da ionosfera, onde se pode notar uma maior atividade da ionosfera nos meses de abril (outono) e outubro (primavera), logo após os equinócios e menores atividades em janeiro (verão) e julho (inverno), após os solstícios.

Considerando-se que a ionosfera apresenta variações temporais, que compreendem as variações diurnas, sazonais e de ciclos de longos períodos, neste caso, não se têm elementos que permitam comparar as variações diárias dos coeficientes que descrevem o efeito sistemático em L_1 . Uma comparação dos coeficientes estimados com a pseudodistância (anexo 02), respectivamente com os estimados com a pseudodistância filtrada (anexo 03) e com a fase da portadora (anexo 04), mostra que os valores médios de cada um dos coeficientes são menores do que os obtidos, a partir da pseudodistância. As maiores diferenças estão nos coeficientes a_1 e a_3 . No caso do coeficiente a_1 , chega a ser em média 0,220 m a diferença para pseudodistância filtrada e de 0,318 m para a fase; e representam, respectivamente, uma redução nos valores dos coeficientes da ordem de 5,6% e 8,1%. A precisão (1σ) dos coeficientes também é melhor. Para a_1 , a precisão média foi de 0,010 m e 0,008 m, respectivamente, para os coeficientes estimados, a partir da pseudodistância filtrada e fase, enquanto a obtida pela

pseudodistância foi de 0,018 m.

Quanto às tendências interfrequências dos receptores e satélites em L_1 , a comparação só pode ser feita com as obtidas, a partir da pseudodistância e pseudodistância filtrada. Ao contrário do que ocorreu com os coeficientes, os valores médios dos erros sistemáticos dos receptores aumentaram, em relação aos obtidos com as pseudodistâncias. Esses aumentos foram, em média, da ordem de 0,252 m para as estações da RBMC, que utilizam receptores Trimble 4000 SSI; e de 0,519 m para a estação FORT, equipada com receptor Turbo Rogue SNR 800. O comportamento dos erros para cada estação é similar. Seus valores máximos ocorrem em janeiro e outubro, enquanto os mínimos, em abril e julho, conforme figura 6.3. A precisão média desses parâmetros foi de 0,019 m para a pseudodistância e de 0,014 m para a pseudodistância filtrada. A média das variações foi da ordem de 3,282 m para os valores estimados com a pseudodistância e de 3,501 m com a pseudodistância filtrada.

Quanto aos erros sistemáticos dos satélites (figura 6.4), as médias das diferenças individuais de cada satélite mostram um comportamento aleatório. A máxima discrepância absoluta dessas médias foi da ordem de 0,324 m para o satélites 07. O comportamento dos erros para cada satélite é similar e a discrepância média entre os valores máximos e mínimos de cada satélite foi de, aproximadamente, 2,040 m e 2,263 m, respectivamente, as estimativas obtidas com a pseudodistância e pseudodistância filtrada. As maiores discrepâncias ocorreram principalmente no mês de outubro. Esse comportamento mostra que os erros sistemáticos dos satélites não são estáveis. As precisões obtidas para os parâmetros indicam valores médios de 0,039 m para aqueles estimados com

pseudodistância e de 0,027 m para a pseudodistância filtrada.

Os parâmetros $(F[(\lambda_2 N_2^s - \lambda_1 N_1^s) + (S_{\phi 2}^s - S_{\phi 1}^s) + (R_{\phi 2} - R_{\phi 1})])$ estimados, a partir da fase da portadora apresentam desvios que chegam a atingir valores da ordem 0,740 m, principalmente para satélites com arcos de passagem curta. No processamento, tentou-se eliminar passagens de satélites menores do que 20 minutos de rastreo contínuo. Isto fez com que os desvios padrão se reduzissem a 1/3 do valor inicial. No entanto, os valores dos coeficientes estimados foram completamente diferentes dos aqui apresentados.

No processamento com a fase da portadora, o índice médio de rejeição das observáveis foi de 0,8%, quando se utiliza a pseudodistância filtrada pela fase, a rejeição foi de 3,1%. E, com a pseudodistância, 54,1% das observáveis foram rejeitadas. O número de coeficientes não significativos é maior, quando se utiliza a pseudodistância no processamento.

Em resumo, da análise dos resultados obtidos, tem-se que os parâmetros estimados com a pseudodistância filtrada pela fase da portadora são os que apresentam a melhor precisão e menor número de observações rejeitadas.

7 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DO MODELO

7.1 Experimentos

Com a finalidade de se analisarem os resultados advindos do modelo implementado, apresentado no capítulo anterior, experimentos foram realizados, utilizando-se os dados das estações da RBMC.

O programa computacional desenvolvido, fluxograma em anexo (anexo 05), lê o arquivo que contém os coeficientes do modelo e, a partir desses e do conhecimento de um valor aproximado para a latitude, longitude e altitude da estação, pode-se efetuar correções nas observáveis realizadas com a portadora L_1 . Essas correções podem ser aplicadas na estação base, que pode ou não pertencer a RBMC, e nas estações cujas coordenadas se deseja determinar. Os arquivos de observações utilizados, para calcular os coeficientes, e os que serão corrigidos devem estar no formato RINEX. Isto viabiliza o processamento dos dados em qualquer software GPS, haja vista que eles devem aceitar o formato RINEX. O ideal seria corrigir as observáveis no próprio software, durante o processamento, ao invés de corrigir o arquivo de observações. Por exemplo, o software GPS *Bernese* utiliza os coeficientes estimados para o modelo da ionosfera, desenvolvido pelo CODE, durante o processamento.

Foram realizados testes com posicionamento absoluto, ou por ponto, e posicionamento relativo. O posicionamento por ponto foi processado com o software GPSPACE Versão 3.2, desenvolvido pelo *Geodetic Survey Division* (GSD), do *Natural Resources Canada* (NRCan) (NRCan, 1997). As linhas de base utilizadas

na análise foram processadas com o software GPSurvey Versão 2.2 (Trimble, 1996) da *Trimble Navigation Limited*.

Para o posicionamento por ponto foram utilizados dados da estação GPS da RBMC de Presidente Prudente (UEPP), localizado na FCT/Unesp – Câmpus de Presidente Prudente, coletados em 1998 e abrangendo uma semana de cada estação do ano.

Para o posicionamento relativo, as bases foram coletadas com receptores GPS Ashtech ZXII de dupla frequência, em dezembro de 1997 e durante o ano de 1998. Neste posicionamento, a maioria das bases foram processadas em relação à estação UEPP e algumas com a estação de Cuiabá (CUIB).

Nesses testes, para se estimarem os parâmetros do modelo, adotou-se o valor de 400 km para a altitude da camada ionosférica, dados GPS coletados a cada 30 segundos e as observáveis com elevação igual ou superior a 15 graus.

7.2 Posicionamento por Ponto

Uma das formas de se analisar a qualidade do modelo implementado é comparar os resultados obtidos com a adoção do modelo com os considerados verdadeiros. No caso em questão, adotaram-se como “verdade de terreno”, as coordenadas SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul) da estação UEPP, que também foram estimadas, a partir de observação GPS corrigidas com os parâmetros do modelo da ionosfera em teste. Vale ressaltar que, neste caso, a estação UEPP não participou do conjunto das estações que proporcionaram dados, para estimar os parâmetros do modelo, o que nos leva a

resultados independentes.

Para posicionamento por ponto, a partir das observações de pseudodistância, derivadas do código C/A, utilizaram-se dados da estação UEPP, coletados, durante uma semana, de cada uma das quatro estações do ano. Os valores estimados para as coordenadas cartesianas (X,Y,Z) foram comparados com os valores considerados *verdadeiros*, para os seguintes casos:

- sem correção do efeito da ionosfera (SCI); e
- com correção do efeito da ionosfera (CCI).

Como valor verdadeiro para as coordenadas da estação UEPP, consideraram-se as coordenadas fornecidas pelo IBGE (1997), no SIRGAS, época 1995,4, que apresentam precisão de poucos centímetros. Essas coordenadas foram transformadas para as épocas do posicionamento, usando-se o modelo NNR-NUVEL-1A (*No Net Rotation – Northern University Velocity Model - 1A*) (McCarthy, 1996).

7.2.1 Estratégia de Processamento

No processamento, utilizaram-se as efemérides precisas e correções do relógio dos satélites, geradas pelo GSD/NRCan. O objetivo disto foi eliminar os efeitos da disponibilidade seletiva (SA), que é a maior fonte de erro no posicionamento por ponto. Essa limitação do sistema GPS aos usuários civis consiste na manipulação das efemérides transmitidas e desestabilização do relógio

Na figura 7.1, encontram-se as discrepâncias (ΔX , ΔY , ΔZ) entre as coordenadas cartesianas estimadas para a estação UEPP e as tomadas como verdadeiras, inclusive a resultante ($\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$). As coordenadas estimadas para a estação UEPP têm, como observáveis, as pseudodistâncias (C/A), coletadas em sessões de 24 horas, e o seu valor representa a média dos valores estimados para cada época. Dois casos são apresentados: solução sem as correções do efeito sistemático da ionosfera (SCI) e solução com as correções (CCI). As correções nas pseudodistâncias foram calculadas com os coeficientes da série, estimados, a partir das pseudodistâncias (P), pseudodistâncias filtradas pela fase da portadora (P/F) e fase da portadora (F), coletadas nas portadoras L1 e L2. Vale salientar, conforme já citado, que, neste caso, a estação UEPP não participou da estimativa dos parâmetros do modelo, para não influenciar nos resultados.

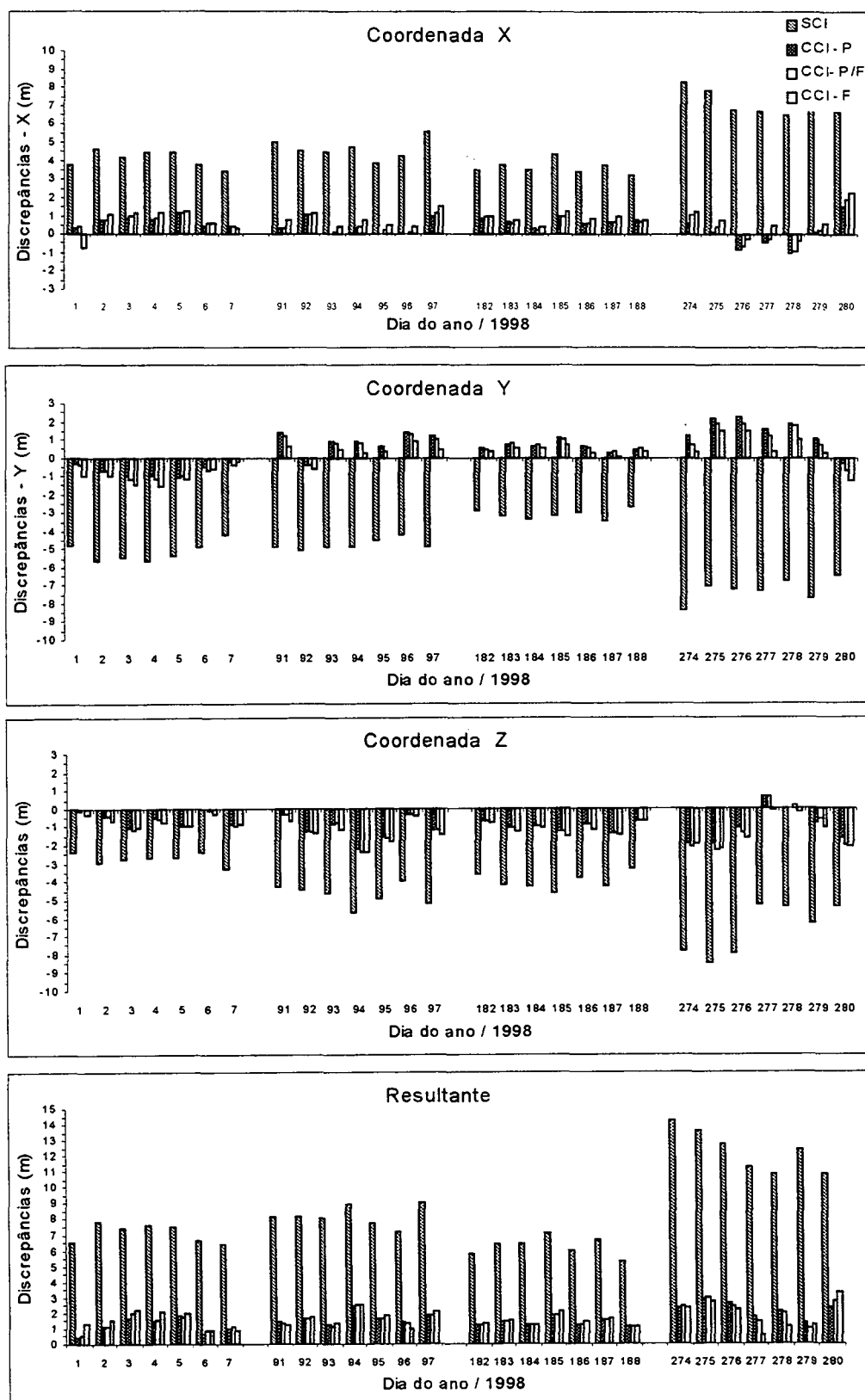


Figura 7.1 – Discrepâncias entre as coordenadas e resultante - Estação UEPP

Na figura 7.1, podem-se verificar as discrepâncias entre as coordenadas corrigidas e as não corrigidas do efeito da ionosfera, bem como o erro resultante. Não há diferenças significativas entre as discrepâncias das coordenadas corrigidas do efeito da ionosfera, obtidas com a pseudodistância corrigida, a partir dos coeficientes da série, estimados com a pseudodistância, pseudodistância filtrada pela fase da portadora ou pela própria fase da portadora (anexo 06). Os valores a serem apresentados estão baseados nas correções efetuadas, a partir das pseudodistâncias filtradas.

As discrepâncias médias indicam diferenças melhores do que um metro para as coordenadas cartesianas, e, em termos do erro resultante, houve uma redução média da ordem de 80,7%, que corresponde a uma redução do erro de 8,44 m para 1,61 m. Em termos de valores máximo e mínimo, têm-se 14,21 m e 5,33 m, respectivamente, para o caso sem correção do efeito sistemático da ionosfera, que, após a correção, passaram ser 2,96 m e 0,55 m.

A figura 7.2 apresenta a acuracidade do posicionamento por ponto para a estação UEPP, sem e com a correção da ionosfera. O seu valor é expresso, através do erro médio quadrático (RMS), e indica a acuracidade das coordenadas estimadas de uma época qualquer, com 68,3% de probabilidade (1σ).

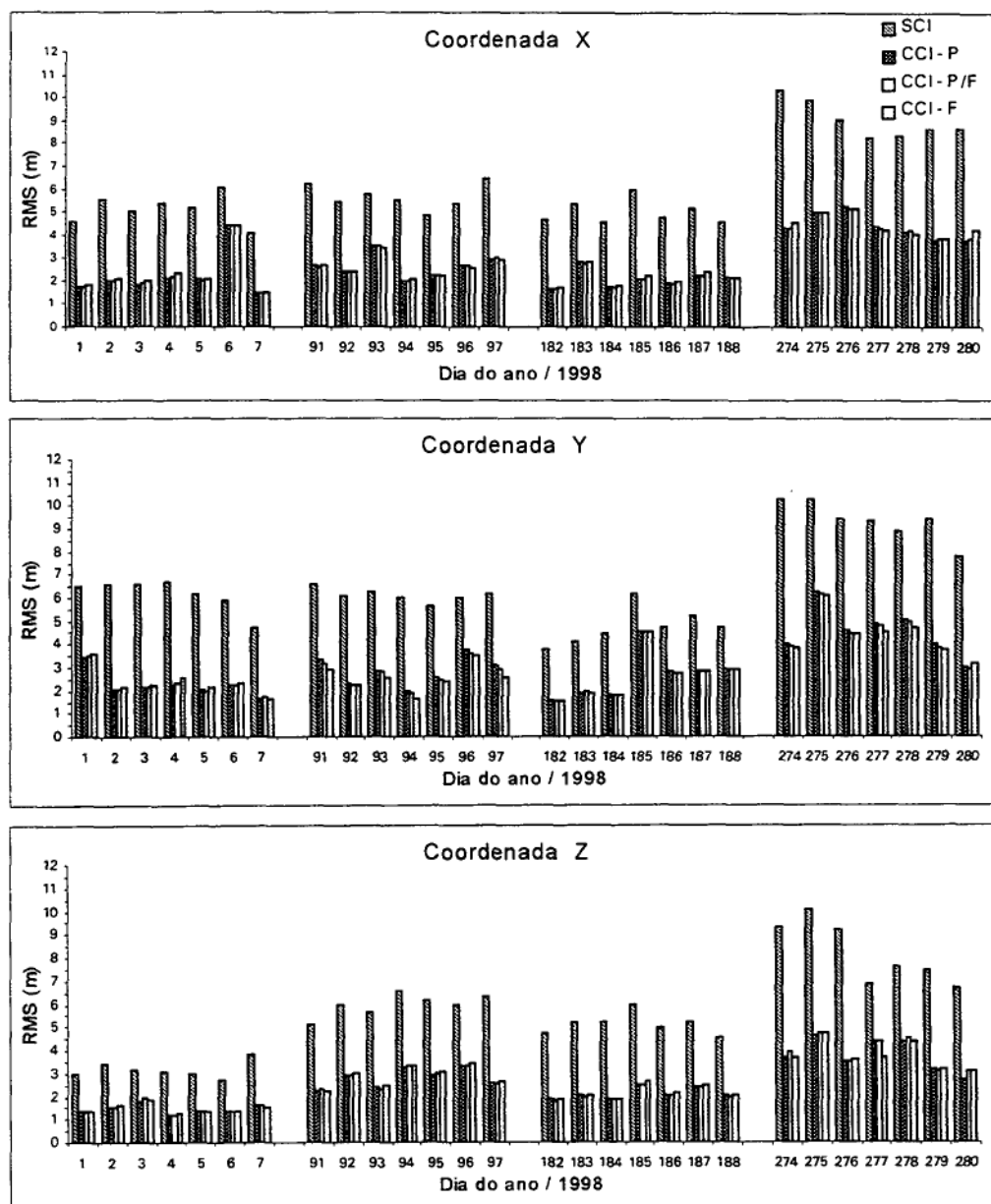


Figura 7.2 – RMS – Posicionamento por ponto – Estação UEPP

A partir da figura 7.2, verifica-se, também, que, após se aplicarem as correções do efeito sistemático da ionosfera, houve melhora no posicionamento, quanto à acuracidade. Essa redução (anexo 07) chega a ser da ordem de 54,3%, atingindo, em média 5 m para a acuracidade resultante do ponto, que corresponde, em média, a uma acuracidade da ordem de 3 m para as coordenadas cartesianas X e Y e de 2,6 m para Z. Os valores, máximo e mínimo, da acuracidade resultante

para o ponto, sem a correção, são de 17,82 m e 7,31 m, respectivamente, reduzindo-se para 9,22 m e 2,76 m, após a correção do erro sistemático.

A precisão das coordenadas estimadas para cada época é apresentada na figura 7.3. O desvio padrão é o parâmetro utilizado, para medir o grau de dispersão dos resultados. Neste caso, representa a dispersão (1σ) das coordenadas de uma época relativa à média.

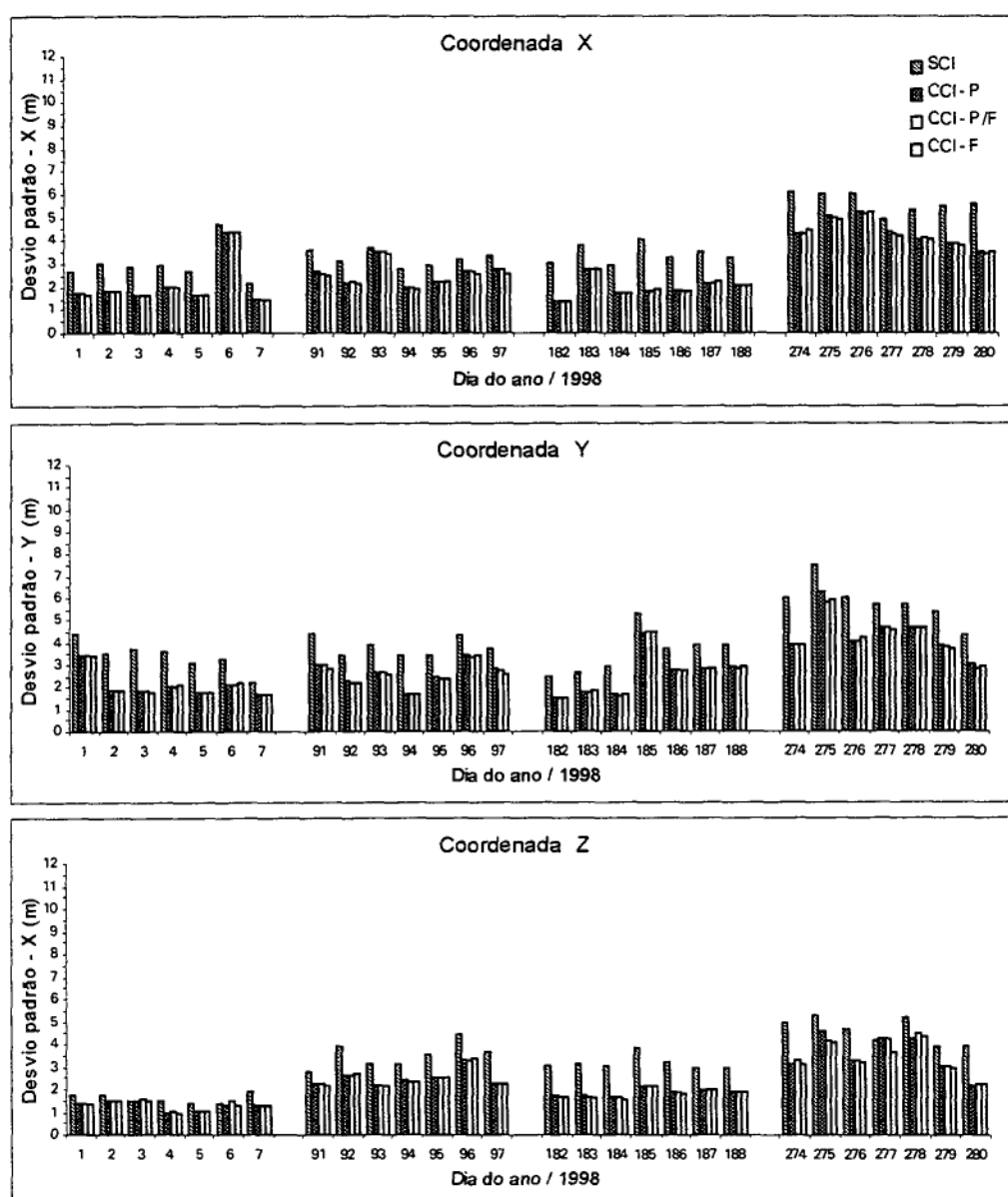


Figura 7.3 – Desvio padrão das coordenadas estimadas – Estação UEPP

A precisão na resultante das discrepâncias melhorou algo em torno de 30,5%, que corresponde a um desvio padrão médio para as coordenadas cartesianas X e Y de 2,80 m e 2,30 m para a coordenada Z (anexo 08). Os valores, máximo e mínimo, sem se aplicar a correção, foram de 11,01 m e 3,61 m para a precisão resultante do ponto e reduziram-se para 8,73 m e 2,54 m, respectivamente, depois de corrigidos.

A tabela 7.2 apresenta, de forma resumida, os resultados médios obtidos no experimento. Entre parênteses, está indicada a porcentagem de melhoras conseguidas, com a correção do erro sistemático, devido à ionosfera.

Tabela 7.2 – Resumo dos valores obtidos no posicionamento por ponto.

	Resultante ($\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$)					
Valores	Discrepância (80,7%)		Acurácia - 1σ (54,3%)		Precisão - 1σ (30,5%)	
	SCI	CCI	SCI	CCI	SSI	CCI
Máximo	14,21 m	2,96 m	17,47 m	9,22 m	11,01 m	8,72 m
Mínimo	5,33 m	0,55 m	7,31 m	2,76 m	3,61 m	2,53 m
Média	8,44 m	1,61 m	10,72 m	5,94 m	6,56 m	4,63 m

Em termos de latitude, longitude e altitude geométrica, as resultantes da discrepância (anexo 09), da acuracidade (anexo 10) e da precisão (anexo 11) são similares às obtidas com as coordenadas cartesianas (X, Y, Z). Por exemplo, a figura 7.4 mostra o comportamento da altitude geométrica para o posicionamento por ponto. Nela se concentra a maior influência do erro sistemático, devido à ionosfera.

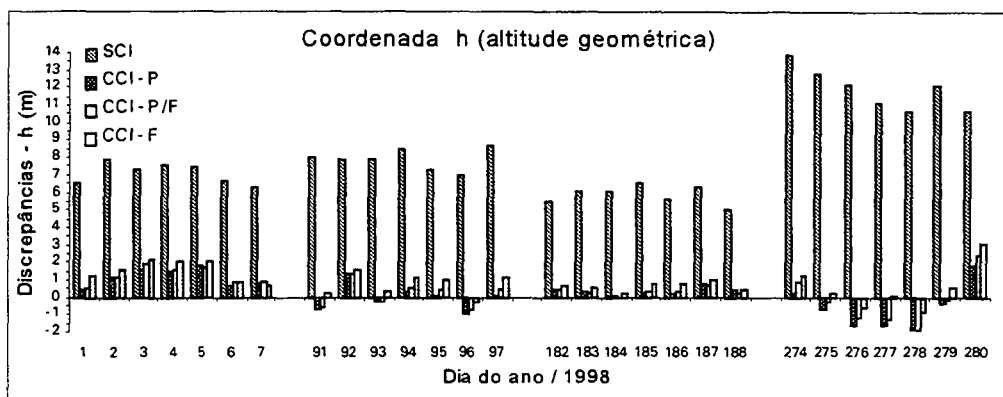


Figura 7.4 – Discrepâncias em altitude geométrica – Estação UEPP

Os valores, máximo e mínimo, para as discrepâncias das altitudes, sem a correção, foram de 13,86 m e 5,03 m, com uma média de 8,20 m, ao passo que, após a correção, os mesmos assumiram magnitudes bem menores, da ordem 2,34 m e -1,92 m, respectivamente, para o máximo e mínimo, com uma média de 0,36 m. Para o erro médio quadrático, os valores máximo, mínimo e médio foram, respectivamente, de 8,00 m, 0,83 m e 3,68 m, após a correção do efeito da ionosfera, ao passo que os valores sem correção foram de 16,50 m, 7,04 m e 10,06 m. Valores similares foram obtidos, para o desvio padrão da altitude, após a correção, respectivamente de 7,99 m, 1,81 m e 3,69 para os valores máximo, mínimo e médio, que, sem a correção, foram de 10,21 m, 2,21 m e 5,77 m.

Com o objetivo de se mostrar o comportamento das coordenadas cartesianas, com e sem o erro sistemático, devido à ionosfera, durante as 24 horas do dia, serão mostradas as posições estimadas para cada época. Considerou-se o primeiro dia da primeira e última semana, mostradas, respectivamente, nas figuras 7.5 e 7.6. As semanas intermediárias apresentam um comportamento médio, similar ao da primeira.

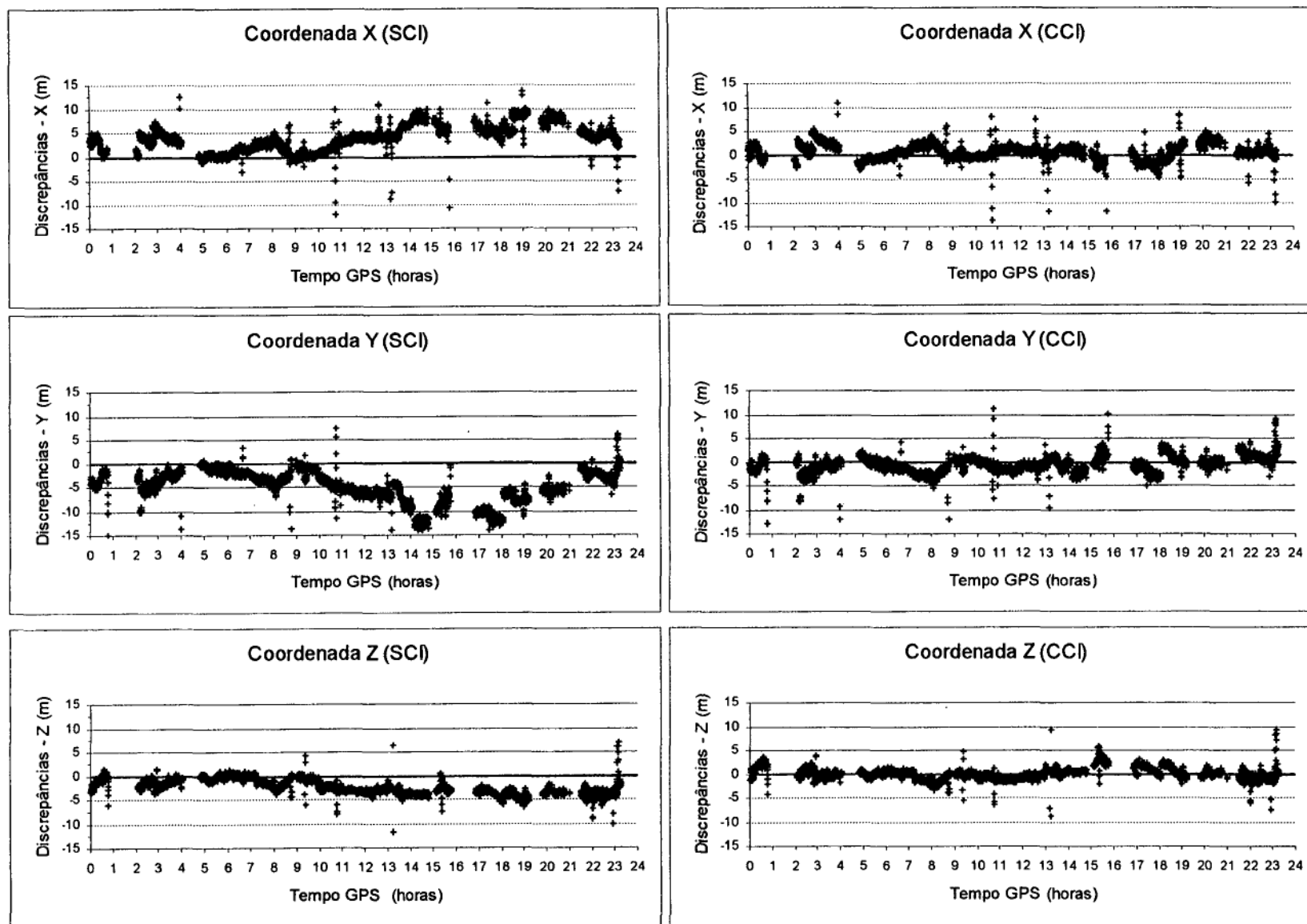


Figura 7.5 – Posicionamento por ponto – época por época – Estação UEPP (001/98)

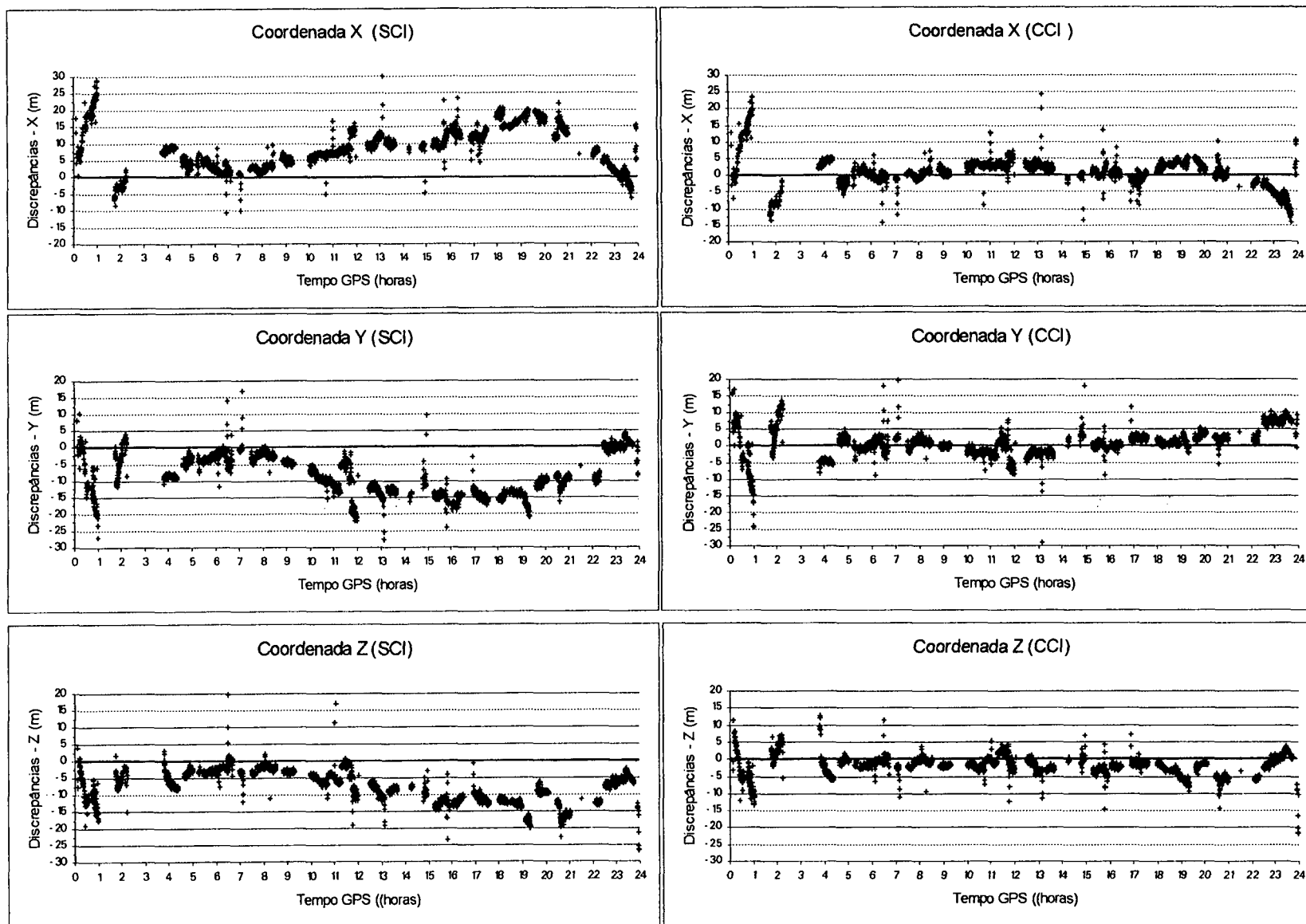


Figura 7.6 – Posicionamento por ponto – época por época – Estação UEPP (274/98)

Comparando-se as figuras 7.5 e 7.6, pode-se verificar uma atividade da ionosfera maior no dia 274/98, que corresponde a primeiro de outubro de 1998, do que no dia 01 de janeiro de 1998, devido à estação do ano. Nota-se que ocorreu uma anomalia na ionosfera, próximo a zero hora do tempo GPS, que corresponde, aproximadamente, às 21:00 horas locais, pois a magnitude das discrepâncias são bem evidenciadas. Isto é característica de distúrbios, devido à cintilação que ocorre de uma hora, após o pôr do Sol, até, aproximadamente, à meia noite local, que, no Brasil, são máximas de setembro a março (Campos et al., 1993).

7.2.3 Atraso Ionosférico Vertical

Com o objetivo de se mostrar o comportamento do erro sistemático, durante o período de 24 horas do dia, foram elaboradas as figuras 7.7 e 7.8 para os dias 001/98 e 274/98 da estação UEPP. Elas mostram o atraso ionosférico observado e projetado na vertical ($I_{1\text{obs}}^v$), em função da hora local (t) do ponto ionosférico e da diferença (B^s) entre a da latitude do ponto sub-ionosférico e latitude da estação UEPP. O atraso ionosférico vertical observado é calculado por meio da equação:

$$I_{1\text{obs}}^v = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_{2r}^s - P_{1r}^s) \cos(z'^s). \quad (7.1)$$

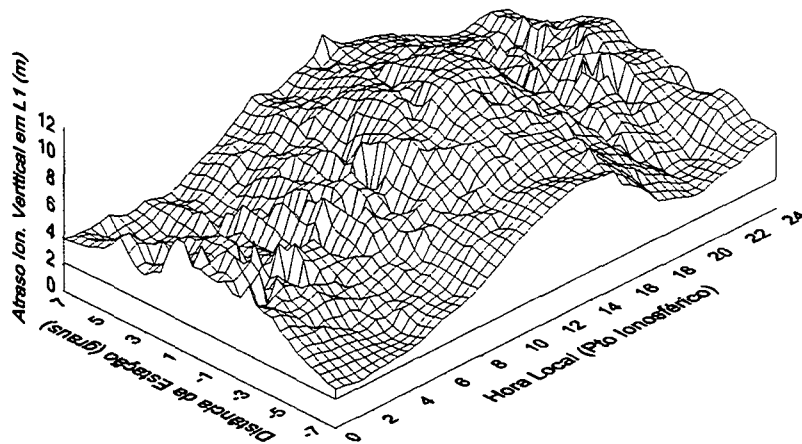


Figura 7.7 - Atraso ionosférico vertical – Estação UEPP (001/98)

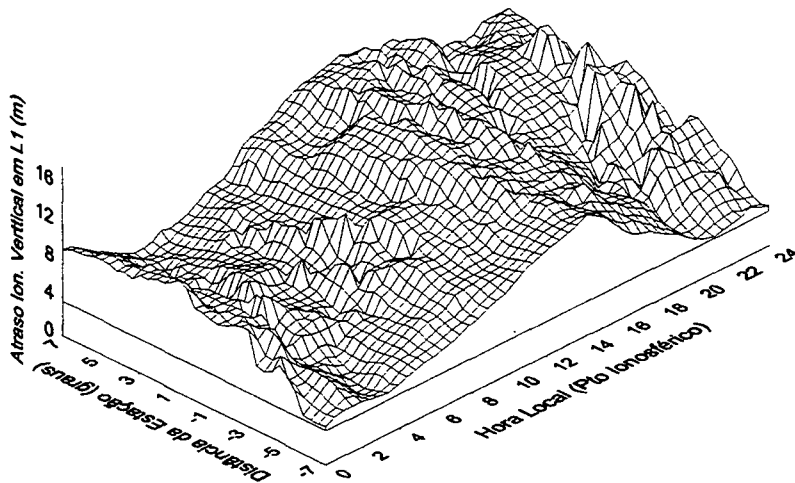


Figura 7.8 - Atraso ionosférico vertical – Estação UEPP (274/98)

Convém salientar que, nas figuras 7.7 e 7.8, o atraso ionosférico vertical observado contém o erro sistemático interfrequência do receptor e dos satélites. Na realidade, o eixo Z de cada uma das figuras representa o atraso, devido à ionosfera, acrescido do erro interfrequência em L_1 .

Após se estimarem os coeficientes do modelo, utilizando-se das demais estações da RBMC, calcularam-se as correções, devido à ionosfera, para a estação GPS em questão. As figuras 7.9 e 7.10 mostram o atraso ionosférico vertical (I_1^V), calculado, respectivamente, para os dias 001/98 e 274/98, com o modelo adotado, a partir da equação (5.38).

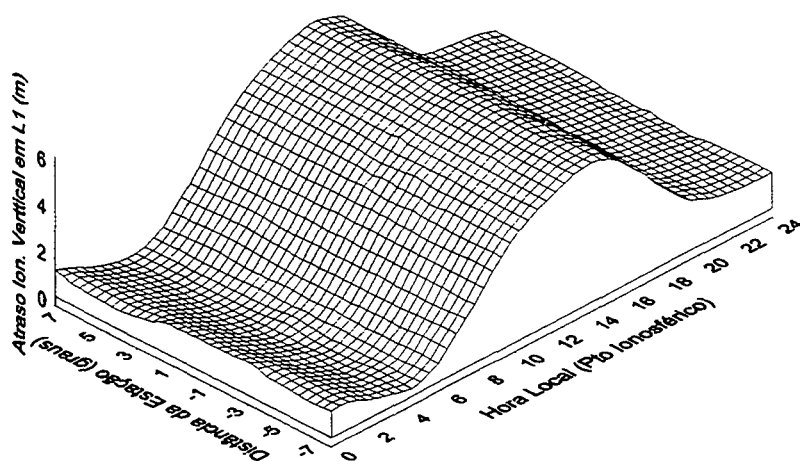


Figura 7.9 - Atraso ionosférico vertical estimado – Estação UEPP (001/98)

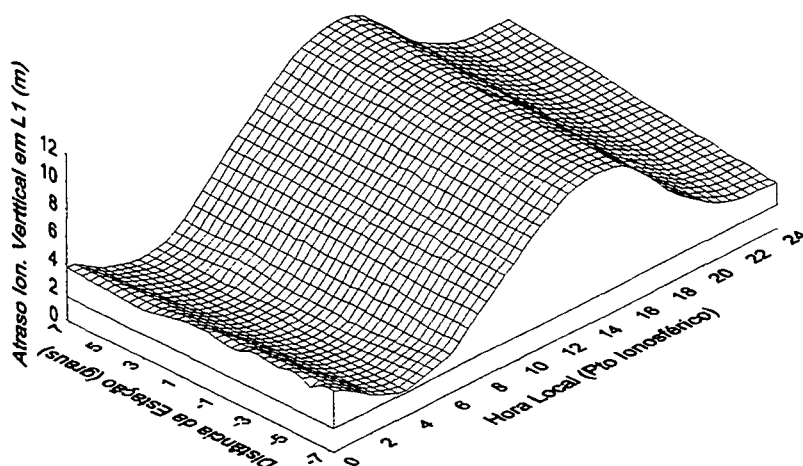


Fig. 7.10 - Atraso ionosférico vertical estimado – Estação UEPP (274/98)

As figuras 7.9 e 7.10 representam o comportamento regular da ionosfera, porém, os valores dos erros sistemáticos calculados para o dia 274/98 são maiores do que o do dia 001/98. Pode-se notar, através dessas figuras, que a atividade máxima diária da ionosfera se dá próximo às 14:00 horas locais.

7.3 Posicionamento Relativo

Além da análise da qualidade do modelo proposto, a partir do posicionamento por ponto, realizaram-se alguns experimentos em que o enfoque foi o posicionamento relativo, tendo, como observável, apenas a fase da portadora L_1 . A maioria das linhas-base foram processadas em relação à estação UEPP, enquanto, em outras se utilizou CUIB. Ao contrário do modelo utilizado na avaliação do posicionamento por ponto, todas as estações disponíveis da RBMC participaram do ajustamento, para estimar os parâmetros do modelo.

Os resultados obtidos no processamento das bases formadas com os receptores de dupla frequência, utilizando a combinação linear livre da ionosfera (L_o), foram considerados como valores *verdadeiros*, permitindo, assim, a análise do desempenho do modelo. Para tanto, as bases foram processadas com o software GPSurvey Versão 2.2.

O procedimento, para verificar as melhorias advindas do modelo ionosférico, foi similar ao adotado no posicionamento por ponto. O processamento foi realizado com a portadora L_1 , nas duas seguintes condições:

- sem correção do efeito da ionosfera (SCI); e

- com correção do efeito da ionosfera (CCI).

As efemérides precisas e correções do relógio dos satélites disponibilizados pelo IGS foram obtidas, via internet, do seguinte endereço: <http://www.cddis.gsfc.nasa.gov>. O mesmo procedimento foi utilizado, para processar todas as linhas-base. O modelo adotado, para corrigir o efeito da troposfera, foi o de Hopfield, com atmosfera padrão; e as observáveis abaixo de 15 graus de elevação não participaram do processamento.

Tal como no posicionamento por ponto, os coeficientes estimados, a partir da pseudodistância, pseudodistância filtrada pela fase da portadora e fase da portadora, produziram resultados similares. Na análise dos resultados, serão apresentados os resultados do processamento com as observáveis corrigidas do efeito da ionosfera, a partir dos coeficientes estimados com a pseudodistância filtrada pela fase da portadora.

7.3.1 Posicionamento Relativo – Linhas de Base

Nessa etapa do experimento, fizeram parte do posicionamento relativo linhas de base, com comprimento variando de 10 à 215 km, conforme mostrado na figura 7.11.

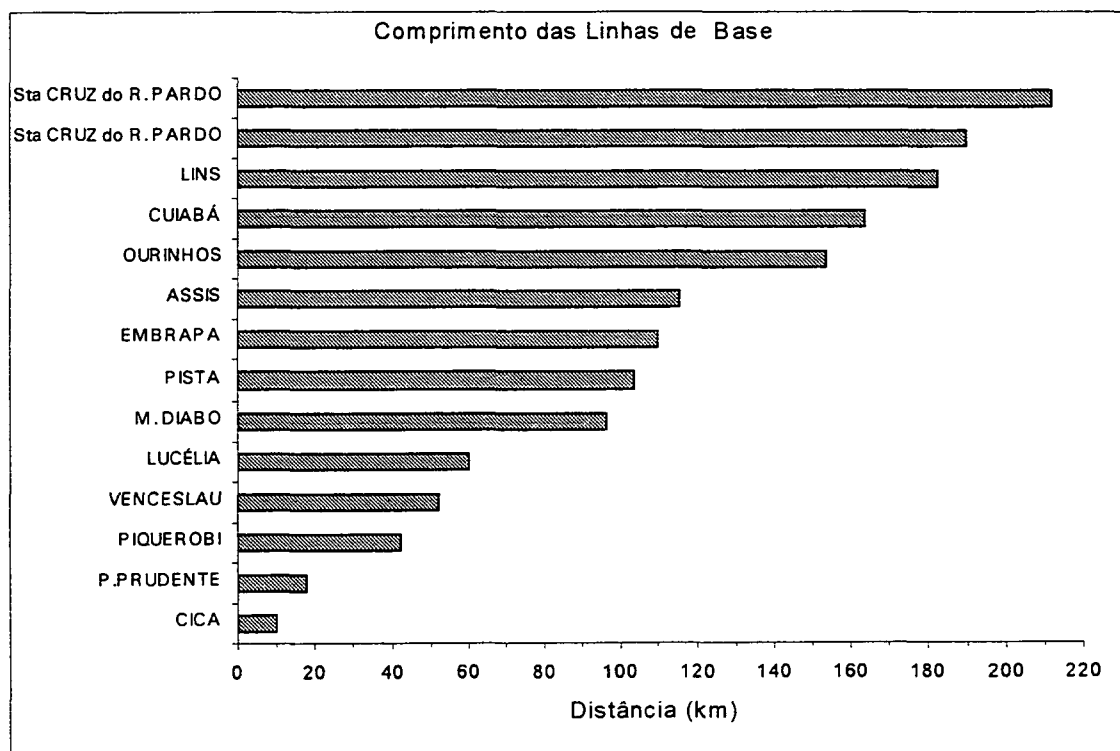


Figura 7.11 – Linhas de base

Algumas linhas de base tiveram suas estações ocupadas próximo às 14:00 horas locais (\cong 17:00 horas TU do tempo GPS), período diário de máxima atividade solar. A tabela 7.3 apresenta várias informações, tais como: linha-base, sessão, dia do ano, efemérides precisas e região onde se situam as estações da linha-base. A distribuição geográfica das bases formadas com a estação UEPP é mostrada na figura 7.12. Com a estação de Cuiabá, foi processada somente uma linha-base.

Tabela 7.3 – Relação de base, sessão (tempo GPS), dia do ano, efemérides precisas e região.

BASES	SESSÃO	DIA/ANO	EFEMÉRIDES	REGIÃO
UEPP – EMB1	17:50 – 20:02	342/97	IGS09351	EMBRAPA
UEPP – EMB2	14:05 – 15:49	343/97	IGS09352	
UEPP – EMB3	15:51 – 18:24	343/97	IGS09352	
UEPP – VENC	12:21 – 18:48	129/98	IGS09566	VENCESLAU
UEPP – VEN1	15:30 – 18:30	129/98	IGS09566	
UEPP – SABE	20:30 – 22:43	153/98	IGS09602/3	PIQUEROBI
UEPP – ESCO	17:47 – 20:03	153/98	IGS09602	
UEPP – LUC1	17:29 – 20:08	183/98	IGS09644	LUCÉLIA
UEPP – LUC2	20:12 – 21:22	183/98	IGS09644	
UEPP – E002 a	16:34 – 20:04	196/98	IGS09663	Sta. CRUZ DO RIO PARDO
UEPP – E059 a	20:03 – 22:08	196/98	IGS09663	
UEPP – E059 b	11:49 – 14:21	197/98	IGS09664	
UEPP – E002 b	14:59 – 14:21	197/98	IGS09664	
UEPP – E120 a	18:45 – 21:23	197/98	IGS09664	OURINHOS
UEPP – E178 a	09:50 – 12:23	198/98	IGS09665	ASSIS
UEPP – E178 b	18:11 – 20:44	198/98	IGS09665	
UEPP – CIC1	13:55 – 15:55	210/98	IGS09683	CICA
UEPP – MDI2	15:28 – 17:18	229/98	IGS09711	M. DIABO
UEPP – MDI3	18:37 – 21:04	229/98	IGS09711	
CUIB – RONB	17:58 – 22:00	253/98	IGS09744	CUIABÁ
CUIB – RONC	14:14 – 15:54	254/98	IGS09745	
CUIB – ROND	16:51 – 20:40	254/98	IGS09745	
CUIB – RONE	17:30 – 20:30	255/98	IGS09746	
CUIB – RONF	16:48 – 19:49	256/98	IGS09750	
UEPP – MDIB	13:03 – 14:33	273/98	IGS09773	M. DIABO
UEPP – MDIC	11:53 – 13:46	281/98	IGS09784	
UEPP – LIN1	12:17 – 14:12	286/98	IGS09792	LINS
UEPP – LIN2	17:07 – 20:14	286/98	IGS09792	
UEPP – 585B	11:08 – 12:08	292/98	IGS09801	P. PRUDENTE
UEPP – 585C	09:44 – 10:44	292/98	IGS09801	
UEPP – PIST	11:36 – 16:52	293/98	IGS09802	PISTA
UEPP – PIS1	11:14 – 13:55	307/98	IGS09802	
UEPP – PIS2	14:13 – 17:23	307/98	IGS09802	

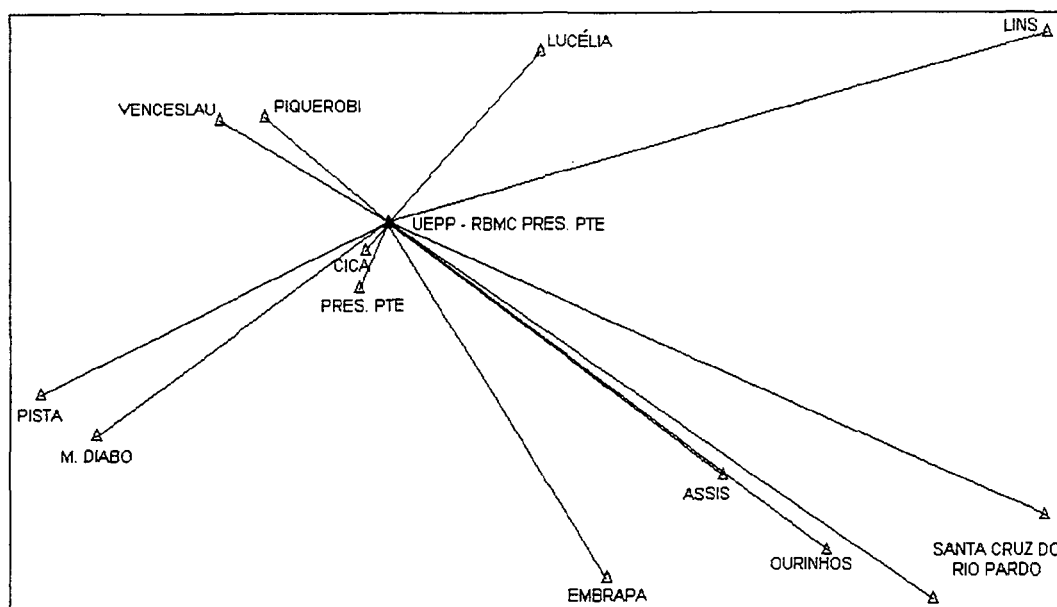


Figura 7.12 – Distribuição geográfica das linhas de base processadas com a estação UEPP

As estações da RBMC utilizadas na estimativa dos parâmetros do modelo estão relacionadas na tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Estações utilizadas na estimativa dos parâmetros – Posicionamento relativo

RBMC	DIAS DO ANO																			
	1997		1998																	
	342	343	129	153	183	196	197	198	210	229	253	254	255	256	273	281	286	292	293	307
BOMJ	x	x		x	x						x	x	x	x	x					
BRAZ	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
CUIB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
PARA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
VICO			x	x	x	x	x	x	x							x		x	x	
FORT	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
IMPZ	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MANA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x	
UEPP	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

A figura 7.13 apresenta as discrepâncias das coordenadas cartesianas (X, Y,

Z) obtidas do processamento com a fase da portadora em L_1 , sem correções (SCI), e com correções (CCI) da ionosfera e as coordenadas obtidas com L_0 (*ion free*), bem como as componentes resultantes. Nesse processamento, as estações base foram consideradas como fixas.

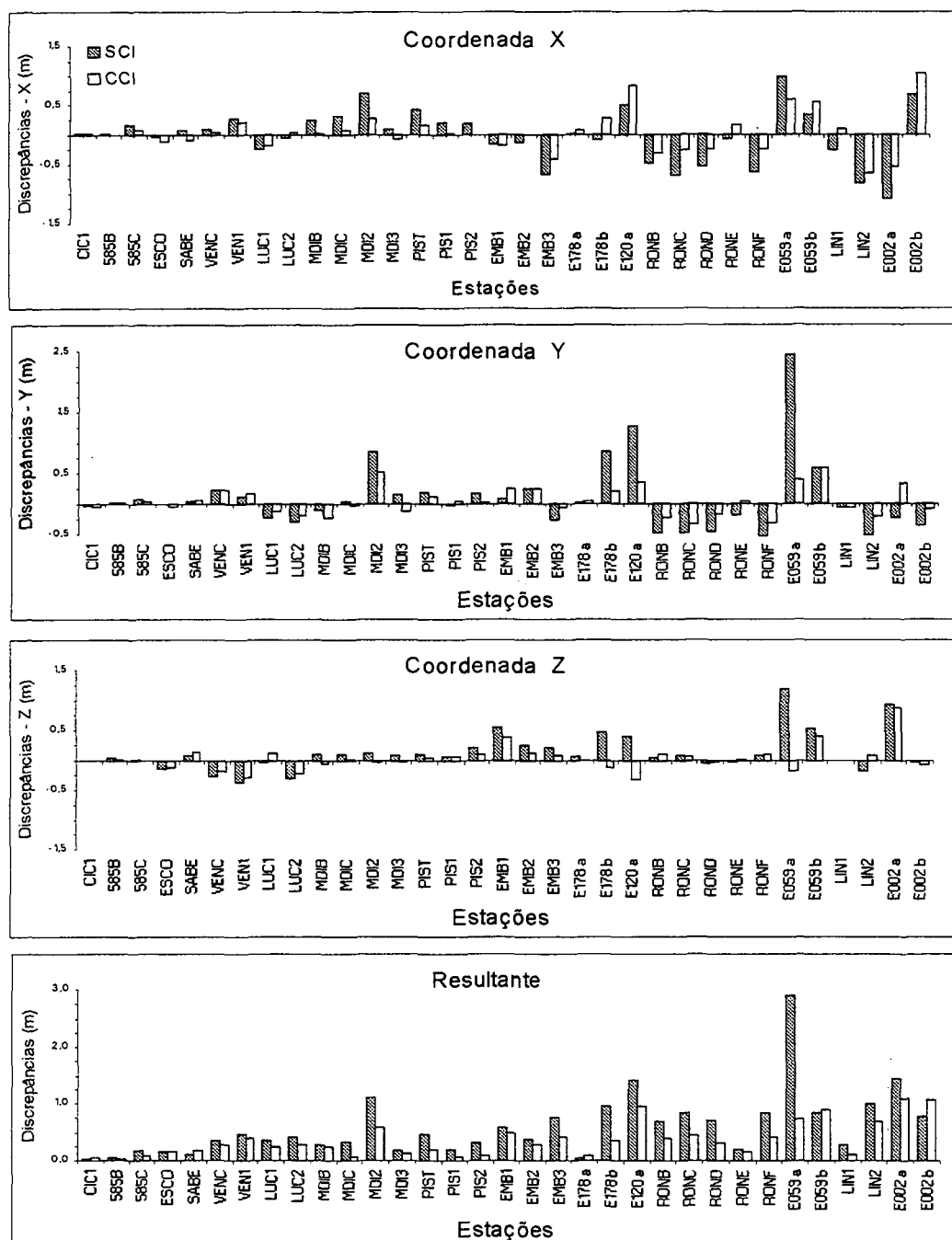


Figura 7.13 – Discrepâncias entre as coordenadas das linhas de base

Na figura 7.13, encontram-se as discrepâncias entre as coordenadas cartesianas e resultante do erro para as estações das linhas de base, corrigidas (CCI), e não (SCI) do efeito da ionosfera, em relação às tomadas como verdadeiras. Pode-se verificar que houve uma redução do erro nas discrepâncias e resultante das bases processadas com a fase da portadora em L_1 , corrigida do efeito sistemático da ionosfera (anexo 12). Em termos médios, a redução foi da ordem de 41,7% na resultante do erro; e representa uma acuracidade média de 0,347 m, ao passo que, sem a correção, foi de 0,597 m.

A precisão nas linhas-base determinadas apresenta uma melhora da ordem de 5%, quando as observáveis foram corrigidas do efeito sistemático da ionosfera, em relação às não corrigidas (anexo 13). Na figura 7.14, é apresentada a precisão obtida no processamento com observável livre da ionosfera (L_0), com a L_1 sem a correção (L_1 - SCI) e corrigida (L_1 -CCI).

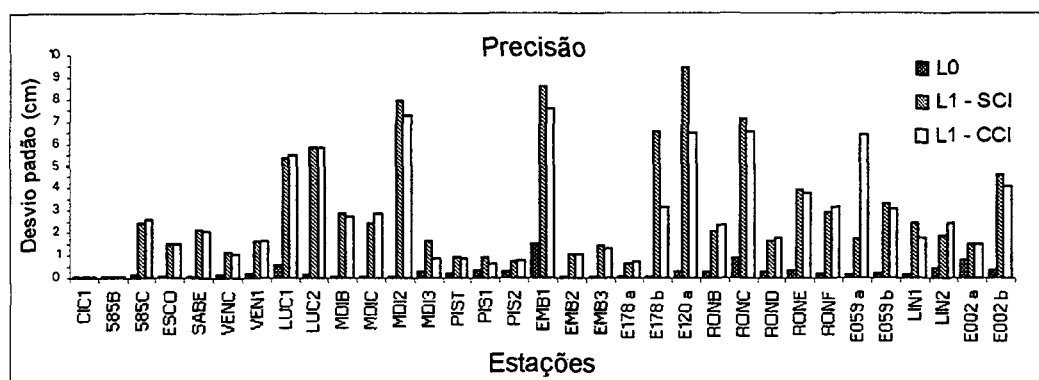


Figura 7.14 – Precisão das linhas de base

A precisão média do processamento relativo com L_0 foi de 0,28 cm, enquanto, com L_1 , foi de 29,9 cm e 28,4 cm, respectivamente, para o caso sem e com

correções do efeito sistemático da ionosfera. Os valores máximos de ambas foram 9,5 cm e 7,6 cm, respectivamente.

Os resíduos das duplas diferenças, após o processamento com L_1 , corrigido ou não do efeito da ionosfera, não apresentaram mudanças significativas, tendo, praticamente, o mesmo comportamento. Os valores das ambigüidades alteraram-se, ficando maiores, no caso em que L_1 foi corrigido. Com exceção das linhas-base superiores a 19,6 km, as ambigüidades para a fase da portadora com L_1 , sem e com a correção, foram fixadas.

Para as linhas de bases inferiores a 17,9 km, as ambigüidades e os resíduos das duplas diferenças foram similares à do processamento com L_0 , e a precisão das linhas-base são melhores do que as obtidas com L_0 . Isto ocorre, porque a combinação linear livre da ionosfera apresenta um ruído maior para a observável L_0 , não oferecendo vantagens no processamento de linhas de bases curtas. Isto, porque os efeitos da ionosfera são praticamente eliminados no posicionamento relativo, utilizando-se apenas uma portadora (Monico, 1998).

Já para linhas de base inferiores 42,5 km, todos os processamentos com L_0 , em conjunto com *wide line*, fixaram as ambigüidades. A partir das linhas de base superiores a 52,4 km, somente, em 44,4 % delas, as ambigüidades foram fixadas.

8 COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 Comentários Finais

Nesta pesquisa, apresentou-se uma revisão sobre o efeito ou impacto da ionosfera nas observáveis GPS coletadas com receptores de uma frequência, bem como a estrutura da ionosfera e as causas das variações do TEC. O princípio do método dos mínimos quadrados foi apresentado, dando ênfase ao ajustamento pelo método paramétrico com injunção, bem como o controle de qualidade aplicado ao ajustamento. Apresenta-se uma revisão sobre as observáveis GPS e suas combinações lineares, com objetivo de mostrar que a combinação linear, livre da ionosfera, reduz os efeitos sistemáticos da ionosfera nos resultados finais do processamento. Alguns modelos ou técnicas de correção do efeito da ionosfera foram apresentados. Porém, devido à característica do modelo desenvolvido por Georgiadiou (1994) ser aplicável somente para uma estação, uma modificação foi implementada. Essa modificação é válida somente, se os parâmetros do modelo forem estimados, a partir da pseudodistância ou pseudodistância filtrada pela fase da portadora. A modificação consistiu na separação dos erros sistemáticos interfrequências dos receptores e dos satélites, estimados em conjunto, no modelo original. Isto é possível, desde que os dados sejam coletados com mais de um receptor de dupla frequência. Porém, no mínimo, a inunção do erro sistemático interfrequência, em L_1 , de um receptor ou satélite é necessária, para que o modelo não apresente deficiência de característica.

Com os dados GPS coletados nas estações da RBMC, estimaram-se os

parâmetros do modelo, para um período de quatro meses do ano de 1998, distribuídos nas quatro estações do ano. Os parâmetros do modelo consistem nos coeficientes da série, que modelam o efeito sistemático da ionosfera, dos erros sistemáticos ou tendências dos receptores e satélites, todos na portadora L_1 . A análise do desempenho do modelo na região equatorial foi realizada, através do posicionamento por ponto e posicionamento relativo.

8.2 Conclusões

Com a modificação implementada no modelo, foi possível separar parte dos erros sistemáticos em L_1 , devido às interfrequências. Os parâmetros estimados com a pseudodistância filtrada pela fase da portadora são os que apresentam as melhores precisões. Os coeficientes estimados para a série apresentam valores diários diferentes, notados principalmente nos coeficientes a_1 e a_3 , mostrando o comportamento temporal diário da ionosfera. Há diferenças relevantes nos coeficientes estimados para o mês de julho e outubro. Isto, de fato, mostra um comportamento sazonal da ionosfera, no tocante às estações do ano. Os erros sistemáticos interfrequências dos receptores, estimados com a pseudodistância filtrada, durante o período do experimento, apresentaram comportamento com uma variação média da ordem de 3,501 m, enquanto os dos satélites foram da ordem de 2,263 m.

O posicionamento por ponto, com a pseudodistância, indicou que a série utilizada, para estimar os efeitos sistemáticos da ionosfera, é apropriada para esses fins, pois proporcionou resultados médios da ordem de metro para as discrepâncias

das coordenadas cartesianas (X, Y, Z) estimadas com sessões de 24 horas. A componente resultante máxima foi de 2,96 m e mínima, de 0,55 m, representando uma correção média de 80,7%, em relação às obtidas sem a correção. O erro médio quadrático também indicou uma acuracidade média de 5 m para cada época, com valor máximo de 9,22 m e mínimo de 2,76 m, após a correção do efeito sistemático da ionosfera, representando uma melhora de 54,4% na acuracidade do ponto. A precisão de cada época também melhorou em torno 30,5%, apresentou um valor médio de 2,80 m para coordenadas cartesianas X e Y e de 2,30 m para Z, com valores máximos de 8,73 m e 2,54 m, respectivamente.

Em coordenadas planas, a maior influência do erro sistemático, devido à ionosfera, concentra-se na altitude da estação. No posicionamento por ponto, as discrepâncias máxima e mínima foram de 2,34 m e -1,92 m, ao passo que os valores obtidos sem a correção foram de 13,86 m e 5,03 m, respectivamente.

Para posicionamento relativo de linhas de base, o modelo somente conseguiu reduzir, em média, 41,7% das discrepâncias, e não houve melhora significativa na precisão, após a correção do erro sistemático. Estudos, nesta direção, devem ser realizados, visando a quantificar os demais erros sistemáticos no posicionamento relativo, pois as discrepâncias restantes podem não ser somente devidos ao efeito ionosférico. Neste caso, podem estar embutidos outros tipos de erros sistemáticos, que não foram reduzidos no processamento relativo. Salienta-se que o modelo de Hopfield com atmosfera padrão foi utilizado, para corrigir o efeito troposférico. Nesses experimentos, as bases com comprimentos inferiores a 17,9 km, processadas com L_1 , corrigidas ou não do efeito da ionosfera, apresentaram resultados melhores do que a combinação linear livre da ionosfera, pois o desvio

padrão da observável fase da portadora em L_1 é menor que o da combinação linear.

8.3 Recomendações

Do exposto, recomenda-se a realização de experimentos, utilizando-se outras funções, para modelar o efeito sistemático da ionosfera. Podem-se citar, por exemplo, polinômios, harmônicos esféricos. Além disto, testar outros valores médios, para a altitude da camada ionosférica e incluir as estações do IGS, principalmente as da América do Sul, a fim de estimar os coeficientes do modelo, abrangendo, dessa forma, área maior da ionosfera.

Recomenda-se aplicar correção na portadora L_2 e analisar a resolução da ambigüidade na combinação linear livre da ionosfera, juntamente com a *wide lane*. Com efeito, no experimento realizado nas linhas de base superiores a 52,4 Km, somente em 44% das bases processadas se conseguiram fixar ambigüidades.

Uma vez que o IGS tem, como meta, a provisão de mapa combinado da ionosfera, a partir dos seus centros individuais de análise, seria importante a produção sistemática de mapas, para o Brasil ou América do Sul, que representem o erro sistemático da ionosfera na portadora L_1 ou conteúdo total de elétrons. Dessa forma, se houver interesse por parte do IGS, pode-se contribuir para a produção do mapa.

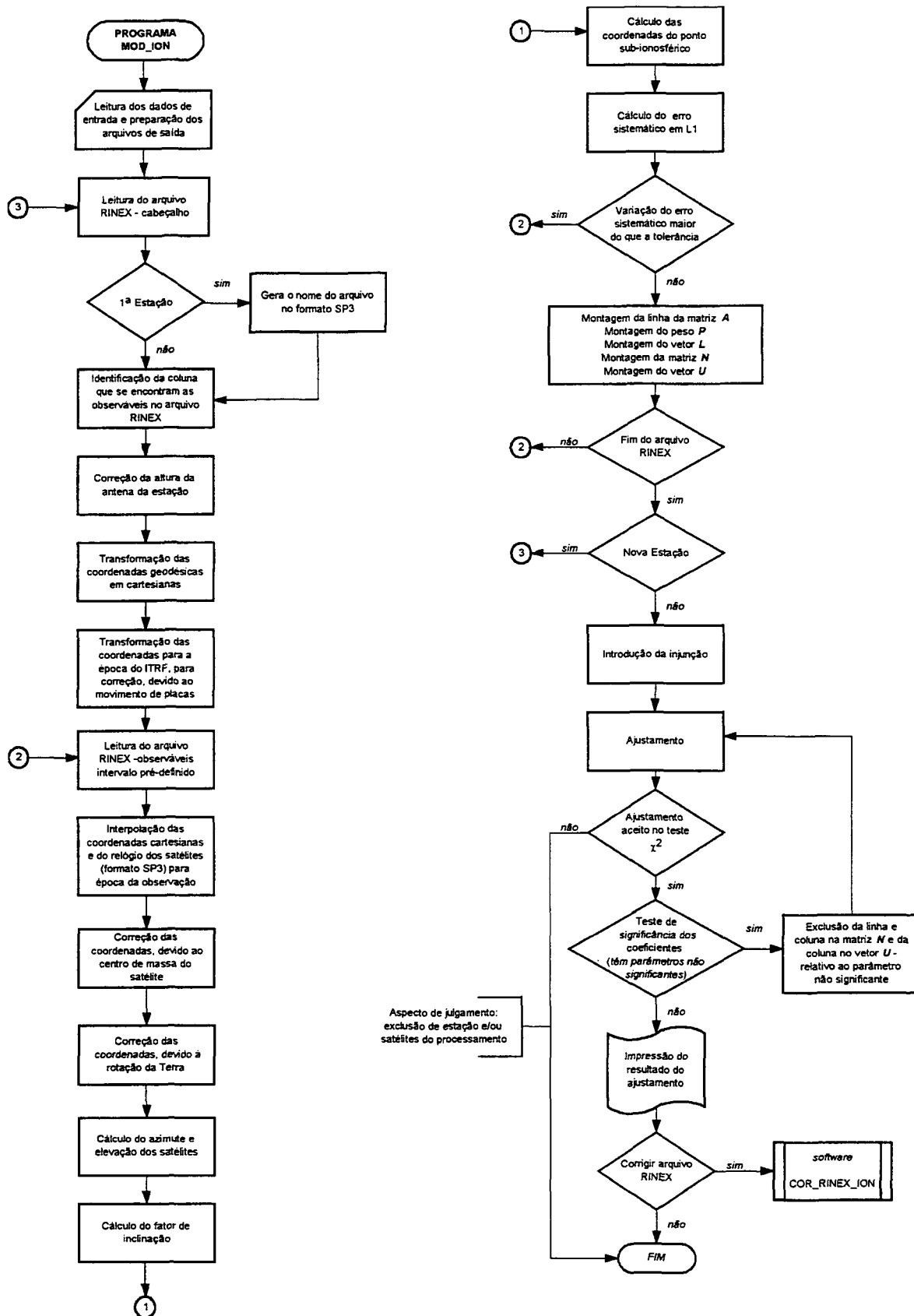
Já que o modelo apresentou resultados promissores em posicionamento por ponto, sugere-se avaliar a sua aplicação em posicionamento com DGPS, principalmente nas técnicas que utilizam o posicionamento por ponto, para se calcularem as correções diferenciais.

Com a viabilidade de armazenamento das observáveis coletadas com o receptor de navegação Garmin 12XL, é possível o pós-processamento dos dados. Nesse caso, recomenda-se a correção das observáveis, devido a erro sistemático da ionosfera, proporcionando, assim, melhores resultados para posição.

Recomenda-se que experimentos sejam realizados durante o período de máxima atividade solar, que ocorrerá por volta do ano 2000-2001, de modo que o modelo possa ser avaliado, para período de máxima atividade solar.

Recomenda-se, ainda, que estudos sejam direcionados na estimativa dos coeficientes da série, uma vez que há a possibilidade de estimá-los para cada estação ou região formada por um determinados conjunto de receptores, considerando-se que o comportamento da ionosfera depende da latitude do receptor.

Anexo 01 - Fluxograma do programa - Parâmetros do modelo da ionosfera



Anexo 02 - Parâmetros estimados com a pseudodistância

Coeficientes

COEF	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
JAN															
Médio	2,899	0,002	2,264	0,622	0,453	-0,178	-0,032	0,268	0,002	0,078	-0,048	-0,063	-0,055	0,074	0,009
Máximo	3,447	0,036	2,681	1,179	0,796	0,250	0,298	0,443	0,169	0,196	0,166	0,115	0,063	0,111	0,015
Mínimo	2,486	-0,041	1,647	0,149	0,123	-0,596	-0,243	0,131	-0,203	-0,128	-0,125	-0,141	-0,138	0,061	-0,007
Variação	0,961	0,077	1,034	1,030	0,673	0,846	0,541	0,312	0,372	0,324	0,291	0,256	0,201	0,050	0,022
ABR															
Médio	4,186	0,071	3,562	0,700	0,805	-0,403	-0,081	0,296	0,018	0,199	0,022	-0,112	0,073	0,123	0,015
Máximo	5,533	0,122	4,737	1,282	1,301	-0,136	0,132	0,672	0,294	0,332	0,140	-0,089	0,151	0,155	0,027
Mínimo	2,987	0,035	2,966	-0,137	0,466	-0,755	-0,287	0,125	-0,208	0,101	-0,103	-0,137	-0,092	0,094	0,009
Variação	2,546	0,087	1,771	1,419	0,835	0,619	0,419	0,547	0,502	0,231	0,243	0,048	0,243	0,061	0,018
JUL															
Médio	2,455	0,073	2,321	-0,005	0,558	-0,281	-0,078	0,150	0,027	0,127	-0,017	-0,098	-0,074	-0,055	0,012
Máximo	3,064	0,093	2,958	0,351	0,994	0,206	0,257	0,324	0,161	0,325	0,091	-0,060	-0,056	0,065	0,017
Mínimo	1,255	0,056	1,557	-0,363	0,331	-0,482	-0,230	-0,118	-0,116	-0,049	-0,069	-0,130	-0,100	-0,118	0,006
Variação	1,809	0,037	1,401	0,714	0,663	0,688	0,487	0,442	0,277	0,374	0,160	0,070	0,044	0,183	0,011
OUT															
Médio	6,110	0,068	4,338	1,482	0,746	-0,658	-0,300	0,401	-0,208	-0,170	0,093	-0,208	-0,178	-0,140	0,027
Máximo	7,465	0,153	5,503	2,752	1,097	-0,124	-0,135	0,673	-0,105	0,197	0,190	-0,122	-0,134	-0,102	0,044
Mínimo	2,467	0,027	2,279	0,255	0,369	-1,306	-0,533	0,128	-0,320	-0,381	-0,135	-0,305	-0,221	-0,181	0,015
Variação	4,998	0,126	3,224	2,497	0,728	1,182	0,398	0,545	0,215	0,578	0,325	0,183	0,087	0,079	0,029
J_A_J_O															
Médio	3,933	0,062	3,128	0,800	0,641	-0,393	-0,120	0,282	-0,056	0,075	0,014	-0,126	-0,045	0,006	0,015
Máximo	7,465	0,153	5,503	2,752	1,301	0,250	0,298	0,673	0,294	0,332	0,190	0,115	0,151	0,155	0,044
Mínimo	1,255	-0,041	1,557	-0,363	0,123	-1,306	-0,533	-0,118	-0,320	-0,381	-0,156	-0,305	-0,221	-0,181	-0,007
Variação	6,210	0,194	3,946	3,115	1,178	1,556	0,831	0,791	0,614	0,713	0,346	0,420	0,372	0,336	0,051

Desvio padrão dos coeficientes

COEF	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
JAN															
Médio	0,0133	0,0008	0,0068	0,0066	0,0047	0,0047	0,0042	0,0042	0,0040	0,0039	0,0038	0,0038	0,0039	0,0039	0,0004
Máximo	0,0157	0,0010	0,0079	0,0081	0,0058	0,0055	0,0050	0,0053	0,0048	0,0046	0,0046	0,0044	0,0042	0,0046	0,0005
Mínimo	0,0103	0,0006	0,0048	0,0046	0,0034	0,0034	0,0030	0,0030	0,0035	0,0027	0,0030	0,0030	0,0036	0,0035	0,0003
Variação	0,0054	0,0004	0,0031	0,0035	0,0024	0,0021	0,0020	0,0023	0,0013	0,0019	0,0016	0,0014	0,0006	0,0011	0,0002
ABR															
Médio	0,0183	0,0011	0,0094	0,0100	0,0067	0,0067	0,0058	0,0061	0,0052	0,0054	0,0053	0,0046	0,0053	0,0059	0,0006
Máximo	0,0249	0,0016	0,0126	0,0134	0,0091	0,0091	0,0081	0,0079	0,0060	0,0073	0,0071	0,0060	0,0071	0,0070	0,0008
Mínimo	0,0140	0,0008	0,0073	0,0073	0,0051	0,0050	0,0046	0,0045	0,0042	0,0041	0,0044	0,0040	0,0041	0,0050	0,0005
Variação	0,0109	0,0008	0,0053	0,0061	0,0040	0,0041	0,0035	0,0034	0,0018	0,0032	0,0027	0,0020	0,0030	0,0020	0,0003
JUL															
Médio	0,0122	0,0007	0,0065	0,0062	0,0044	0,0044	0,0040	0,0039	0,0036	0,0034	0,0034	0,0034	0,0033	0,0033	0,0004
Máximo	0,0146	0,0009	0,0078	0,0071	0,0052	0,0052	0,0045	0,0045	0,0043	0,0041	0,0036	0,0042	0,0036	0,0040	0,0005
Mínimo	0,0102	0,0006	0,0055	0,0052	0,0037	0,0036	0,0032	0,0031	0,0030	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0003
Variação	0,0044	0,0003	0,0023	0,0019	0,0015	0,0016	0,0013	0,0014	0,0013	0,0013	0,0008	0,0014	0,0008	0,0012	0,0002
OUT															
Médio	0,0267	0,0016	0,0140	0,0144	0,0099	0,0098	0,0084	0,0086	0,0078	0,0080	0,0073	0,0074	0,0074	0,0068	0,0009
Máximo	0,0349	0,0020	0,0180	0,0184	0,0127	0,0126	0,0112	0,0111	0,0100	0,0100	0,0096	0,0086	0,0077	0,0081	0,0011
Mínimo	0,0129	0,0008	0,0068	0,0075	0,0048	0,0049	0,0041	0,0043	0,0039	0,0060	0,0037	0,0060	0,0070	0,0059	0,0004
Variação	0,0220	0,0012	0,0112	0,0109	0,0079	0,0077	0,0071	0,0068	0,0061	0,0040	0,0059	0,0026	0,0007	0,0022	0,0007
J_A_J_O															
Médio	0,0177	0,0011	0,0092	0,0097	0,0065	0,0065	0,0055	0,0057	0,0053	0,0051	0,0051	0,0049	0,0044	0,0045	0,0006
Máximo	0,0349	0,0020	0,0180	0,0184	0,0127	0,0126	0,0112	0,0111	0,0100	0,0100	0,0096	0,0086	0,0077	0,0081	0,0011
Mínimo	0,0102	0,0006	0,0048	0,0046	0,0034	0,0034	0,0030	0,0030	0,0030	0,0027	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0003
Variação	0,0247	0,0014	0,0132	0,0138	0,0093	0,0092	0,0082	0,0081	0,0070	0,0073	0,0068	0,0058	0,0049	0,0053	0,0008

Erro sistemático em L1, devido aos receptores

Estação	UEPP	PARA	VICO	BOMJ	BRAZ	CUIB	FORT	IMPZ	MANA
JAN									
Médio	5,880	6,447	6,575			4,844	0,352		7,369
Máximo	6,489	7,127	7,120			5,929	1,036		8,452
Mínimo	5,065	5,918	5,944			4,460	-0,104		6,890
Variação	1,424	1,209	1,176			1,469	1,140		1,562
ABR									
Médio	4,684	4,124	4,474	5,023		4,576	0,183	5,267	7,328
Máximo	5,742	5,189	5,840	5,529		5,212	0,907	6,050	7,973
Mínimo	3,989	3,344	3,636	4,497		4,230	-0,485	4,715	6,690
Variação	1,753	1,845	2,204	1,032		0,982	1,392	1,335	1,283
JUL									
Médio	4,755	5,466	4,795	4,801	6,427	4,786	0,646	5,686	7,476
Máximo	5,111	7,185	6,309	4,990	7,899	6,543	2,687	7,503	9,241
Mínimo	4,378	4,715	4,389	4,600	6,088	4,309	-0,077	5,293	6,953
Variação	0,733	2,470	1,920	0,390	1,811	2,234	2,764	2,210	2,288
OUT									
Médio	6,213	6,996	6,083	5,699	7,436	4,878	0,247	5,650	7,286
Máximo	7,820	8,871	7,794	5,990	8,766	6,094	1,648	7,349	8,593
Mínimo	5,127	5,372	4,878	5,525	6,945	3,979	-0,774	4,450	6,466
Variação	2,693	3,499	2,916	0,465	1,821	2,115	2,422	2,899	2,127
J_A_J_O									
Médio	5,395	5,892	5,443	5,000	6,931	4,772	0,367	5,538	7,368
Máximo	7,820	8,871	7,794	5,990	8,766	6,543	2,687	7,503	9,241
Mínimo	3,989	3,344	3,636	4,497	6,088	3,979	-0,774	4,450	6,466
Variação	3,831	5,527	4,158	1,493	2,678	2,564	3,461	3,053	2,775

Desvio padrão do erro sistemático em L1 - receptores

Estação	UEPP	PARA	VICO	BOMJ	BRAZ	CUIB	FORT	IMPZ	MANA
JAN									
Médio	0,0000	0,0119	0,0121			0,0127	0,0138		0,0124
Máximo	0,0000	0,0140	0,0143			0,0150	0,0162		0,0146
Mínimo	0,0000	0,0093	0,0095			0,0099	0,0107		0,0097
Variação	0,0000	0,0047	0,0048			0,0051	0,0055		0,0049
ABR									
Médio	0,0000	0,0205	0,0184	0,0200		0,0199	0,0222	0,0191	0,0195
Máximo	0,0000	0,0260	0,0264	0,0282		0,0278	0,0316	0,0270	0,0268
Mínimo	0,0000	0,0160	0,0000	0,0131		0,0130	0,0146	0,0127	0,0125
Variação	0,0000	0,0100	0,0264	0,0151		0,0148	0,0170	0,0143	0,0143
JUL									
Médio	0,0000	0,0132	0,0130	0,0146	0,0135	0,0140	0,0158	0,0134	0,0133
Máximo	0,0000	0,0222	0,0160	0,0171	0,0166	0,0187	0,0198	0,0165	0,0163
Mínimo	0,0000	0,0104	0,0106	0,0120	0,0108	0,0115	0,0125	0,0108	0,0106
Variação	0,0000	0,0118	0,0054	0,0051	0,0058	0,0072	0,0073	0,0057	0,0057
OUT									
Médio	0,0000	0,0267	0,0273	0,0290	0,0281	0,0283	0,0319	0,0276	0,0278
Máximo	0,0000	0,0358	0,0363	0,0317	0,0375	0,0378	0,0419	0,0366	0,0368
Mínimo	0,0000	0,0210	0,0215	0,0268	0,0222	0,0225	0,0252	0,0218	0,0219
Variação	0,0000	0,0148	0,0148	0,0049	0,0153	0,0153	0,0167	0,0148	0,0149
J_A_J_O									
Médio	0,0000	0,0180	0,0170	0,0190	0,0208	0,0187	0,0200	0,0201	0,0181
Máximo	0,0000	0,0358	0,0363	0,0317	0,0375	0,0378	0,0419	0,0366	0,0368
Mínimo	0,0000	0,0093	0,0000	0,0120	0,0108	0,0099	0,0107	0,0108	0,0097
Variação	0,0000	0,0265	0,0363	0,0197	0,0267	0,0279	0,0312	0,0258	0,0271

Erro sistemático, em L1 devido aos satélites

SAT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	
JAN																												
Médio	0,144	0,687	-0,195	-0,510	0,099	-0,178	0,613	-0,036	-0,223	0,579		0,173	0,465	0,746	0,835	-0,446	0,269	0,490	-0,217	0,344	0,925	-1,240	-0,368	-0,017	-1,271	-0,805	-0,809	
Máximo	0,639	1,051	0,253	-0,074	0,724	0,592	1,055	0,657	0,215	1,129		0,712	0,847	2,070	2,329	0,160	0,745	0,847	0,282	1,267	1,343	-0,674	0,543	0,380	-0,795	0,331	-0,245	
Mínimo	-0,558	0,373	-0,826	-0,835	-0,136	-0,643	0,337	-0,237	-0,443	0,131		-0,113	-0,189	0,334	0,421	-0,975	-0,272	-0,007	-0,981	-0,245	0,693	-2,827	-0,772	-0,389	-2,014	-1,184	-2,853	
Variação	1,197	0,678	1,079	0,761	0,860	1,235	0,718	0,894	0,658	0,998		0,825	1,036	1,736	1,908	1,135	1,017	0,854	1,263	1,512	0,650	2,153	1,315	0,769	1,219	1,515	2,608	
ABR																												
Médio	0,388	0,642	0,286	-0,983	0,325	0,289	0,730	0,239	-0,088	0,420	-2,554	0,191	0,464	0,874	1,291	-0,783	-0,410	0,844	0,263	0,735	0,669	-0,837	-0,429	-0,631	-0,830	-0,695	-0,421	
Máximo	0,786	1,649	0,651	-0,277	0,563	0,593	1,326	0,539	0,337	1,238	-1,927	0,824	0,974	1,356	1,651	-0,109	0,024	1,269	0,704	1,153	1,224	-0,301	0,198	0,068	-0,491	-0,296	-0,057	
Mínimo	-0,088	0,097	-0,073	-1,742	0,049	-0,044	0,146	-0,002	-0,602	-0,342	-3,185	-0,407	-0,068	0,500	0,975	-1,110	-0,748	0,494	-0,193	0,368	0,028	-1,332	-1,012	-1,176	-1,292	-0,957	-0,824	
Variação	0,874	1,552	0,724	1,465	0,514	0,637	1,180	0,541	0,939	1,580	1,258	1,231	1,042	0,856	0,676	1,001	0,772	0,775	0,897	0,785	1,196	1,031	1,210	1,244	0,801	0,661	0,767	
JUL																												
Médio	0,263	0,339	0,143	-0,700	-0,178	0,032	0,374	-0,276	-0,431	0,736	-2,211	0,484	0,601	0,957	1,051	-0,165	0,180	0,615	0,331	0,499	0,784	-0,730	-0,378	-0,192	-0,872	-1,055	-0,368	
Máximo	0,514	0,646	0,500	-0,065	0,194	0,479	0,671	0,029	-0,202	1,423	-1,977	0,730	0,782	1,208	1,326	0,137	0,522	0,851	0,641	0,761	1,174	-0,506	1,527	0,503	-0,632	-0,689	0,198	
Mínimo	-0,367	-0,021	-0,470	-1,136	-0,647	-0,387	-0,081	-0,740	-0,765	0,161	-2,452	0,247	0,104	0,727	0,781	-0,617	-0,348	0,165	0,041	-0,055	0,498	-1,058	-1,118	-0,572	-1,428	-1,438	-1,581	
Variação	0,881	0,667	0,970	1,071	0,841	0,866	0,752	0,769	0,563	1,262	0,475	0,483	0,678	0,481	0,545	0,754	0,870	0,686	0,600	0,816	0,676	0,552	2,645	1,075	0,796	0,749	1,779	
OUT																												
Médio	0,427	0,905	-0,240	-0,324	-0,159	-0,555	0,584	-0,146	-0,556	0,723	-2,071	0,795	0,892	1,208	0,206	0,444	0,856	0,598	-0,149	0,219	0,787	-1,959	-0,545	0,386	-0,825	-1,216	-0,311	
Máximo	1,668	1,386	0,681	0,259	0,513	0,477	1,178	0,429	-0,172	1,492	-1,631	1,492	1,705	1,775	1,198	1,043	1,276	1,621	0,972	1,345	1,320	-0,246	0,805	1,287	0,209	-0,470	1,054	
Mínimo	-0,313	0,487	-1,088	-1,055	-0,567	-1,182	0,251	-0,445	-0,819	0,210	-2,446	-0,151	0,301	0,540	-0,681	-0,191	0,152	-0,565	-1,228	-0,644	0,265	-3,547	-1,024	-0,062	-1,643	-1,634	-2,802	
Variação	1,981	0,899	1,769	1,314	1,080	1,659	0,927	0,874	0,647	1,282	0,815	1,643	1,404	1,235	1,879	1,234	1,124	2,186	2,200	1,989	1,055	3,301	1,829	1,349	1,852	1,164	3,856	
J_A_J_O																												
Médio	0,305	0,641	-0,004	-0,624	0,018	-0,108	0,575	-0,053	-0,327	0,618	-2,274	0,413	0,606	0,951	0,840	-0,232	0,233	0,635	0,077	0,446	0,796	-1,203	-0,433	-0,117	-0,947	-0,945	-0,477	
Máximo	1,668	1,649	0,681	0,259	0,724	0,593	1,326	0,657	0,337	1,492	-1,631	1,492	1,705	2,070	2,329	1,043	1,276	1,621	0,972	1,345	1,343	-0,246	1,527	1,287	0,209	0,331	1,054	
Mínimo	-0,558	-0,021	-1,088	-1,742	-0,647	-1,182	-0,081	-0,740	-0,819	-0,342	-3,185	-0,407	-0,189	0,334	-0,681	-1,110	-0,748	-0,565	-1,228	-0,644	0,028	-3,547	-1,118	-1,176	-2,014	-1,634	-2,853	
Variação	2,226	1,670	1,769	2,001	1,371	1,775	1,407	1,397	1,156	1,834	1,554	1,899	1,894	1,736	3,010	2,153	2,024	2,186	2,200	1,989	1,315	3,301	2,645	2,463	2,223	1,965	3,907	

Desvio padrão do erro sistemático em L1, devido aos satélites

SAT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	
JAN																												
Médio	0,028	0,027	0,027	0,034	0,027	0,028	0,028	0,029	0,027	0,033		0,027	0,027	0,027	0,028	0,028	0,028	0,027	0,033	0,027	0,029	0,031	0,030	0,028	0,026	0,027	0,031	
Máximo	0,034	0,034	0,032	0,040	0,032	0,033	0,033	0,033	0,031	0,039		0,035	0,031	0,037	0,032	0,035	0,036	0,032	0,039	0,032	0,035	0,037	0,035	0,035	0,031	0,032	0,037	
Mínimo	0,020	0,018	0,019	0,022	0,018	0,019	0,019	0,023	0,018	0,023		0,019	0,019	0,020	0,022	0,020	0,019	0,019	0,023	0,019	0,020	0,022	0,020	0,019	0,018	0,019	0,022	
Variação	0,014	0,015	0,013	0,018	0,013	0,014	0,014	0,010	0,013	0,016		0,016	0,013	0,017	0,010	0,015	0,017	0,013	0,016	0,013	0,015	0,015	0,014	0,016	0,013	0,014	0,015	
ABR																												
Médio	0,040	0,039	0,039	0,047	0,039	0,042	0,039	0,041	0,038	0,048	0,039	0,039	0,038	0,038	0,040	0,040	0,040	0,038	0,047	0,039	0,042	0,044	0,042	0,041	0,037	0,039	0,044	
Máximo	0,055	0,054	0,053	0,066	0,053	0,056	0,055	0,055	0,052	0,065	0,055	0,053	0,052	0,052	0,054	0,055	0,054	0,052	0,063	0,053	0,057	0,061	0,058	0,056	0,051	0,053	0,060	
Mínimo	0,030	0,029	0,028	0,035	0,030	0,032	0,029	0,031	0,029	0,036	0,029	0,030	0,029	0,029	0,031	0,031	0,031	0,029	0,035	0,030	0,031	0,033	0,031	0,031	0,027	0,030	0,033	
Variação	0,025	0,025	0,025	0,031	0,024	0,024	0,026	0,024	0,023	0,029	0,026	0,023	0,023	0,023	0,023	0,025	0,024	0,023	0,028	0,023	0,026	0,028	0,027	0,025	0,024	0,023	0,028	
JUL																												
Médio	0,027	0,025	0,027	0,030	0,025	0,028	0,026	0,026	0,025	0,032	0,025	0,025	0,025	0,025	0,026	0,026	0,025	0,025	0,031	0,025	0,027	0,030	0,028	0,026	0,026	0,025	0,029	
Máximo	0,032	0,030	0,031	0,037	0,031	0,034	0,030	0,030	0,030	0,038	0,030	0,031	0,029	0,030	0,032	0,031	0,031	0,031	0,037	0,031	0,032	0,035	0,033	0,032	0,030	0,029	0,035	
Mínimo	0,022	0,019	0,022	0,023	0,019	0,021	0,019	0,020	0,019	0,025	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,020	0,020	0,020	0,024	0,019	0,021	0,026	0,022	0,020	0,021	0,019	0,025	
Variação	0,010	0,011	0,009	0,014	0,012	0,013	0,011	0,010	0,011	0,013	0,011	0,011	0,010	0,011	0,012	0,011	0,011	0,011	0,012	0,011	0,012	0,009	0,011	0,011	0,009	0,010	0,010	
OUT																												
Médio	0,059	0,054	0,058	0,067	0,057	0,060	0,055	0,058	0,055	0,069	0,055	0,056	0,055	0,054	0,058	0,057	0,056	0,056	0,069	0,056	0,060	0,068	0,060	0,058	0,058	0,055	0,066	
Máximo	0,076	0,071	0,075	0,087	0,074	0,077	0,071	0,077	0,071	0,089	0,072	0,074	0,075	0,071	0,076	0,075	0,072	0,074	0,090	0,072	0,079	0,091	0,079	0,075	0,076	0,071	0,085	
Mínimo	0,047	0,043	0,046	0,054	0,045	0,048	0,043	0,047	0,043	0,054	0,044	0,044	0,042	0,043	0,046	0,044	0,044	0,045	0,055	0,044	0,048	0,052	0,048	0,046	0,045	0,044	0,051	
Variação	0,030	0,028	0,029	0,032	0,029	0,030	0,028	0,030	0,028	0,035	0,028	0,030	0,033	0,028	0,030	0,030	0,028	0,029	0,035	0,028	0,031	0,039	0,031	0,030	0,031	0,027	0,035	
J_A_J_O																												
Médio	0,038	0,036	0,038	0,045	0,037	0,039	0,037	0,039	0,036	0,045	0,039	0,037	0,036	0,036	0,038	0,037	0,037	0,037	0,042	0,037	0,039	0,044	0,040	0,038	0,037	0,037	0,043	
Máximo	0,076	0,071	0,075	0,087	0,074	0,077	0,071	0,077	0,071	0,089	0,072	0,074	0,075	0,071	0,076	0,075	0,072	0,074	0,090	0,072	0,079	0,091	0,079	0,075	0,076	0,071	0,085	
Mínimo	0,020	0,018	0,019	0,022	0,018	0,019	0,019	0,020	0,018	0,023	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,020	0,019	0,019	0,023	0,019	0,020	0,022	0,020	0,019	0,018	0,019	0,022	
Variação	0,056	0,052	0,056	0,064	0,056	0,058	0,052	0,057	0,053	0,067	0,053	0,055	0,056	0,053	0,056	0,055	0,053	0,055	0,066	0,053	0,058	0,069	0,059	0,056	0,058	0,053	0,063	

Anexo 03 - Parâmetros Estimados com a pseudodistância filtrada pela fase da portadora

Coeficientes

COEF	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
JAN															
Médio	2,907	-0,009	2,204	0,554	0,405	-0,229	-0,075	0,289	-0,008	0,077	-0,017	-0,058	-0,056	0,059	0,003
Máximo	3,826	0,020	2,773	1,170	0,778	0,124	0,180	0,495	0,212	0,207	0,149	0,077	0,040	0,126	0,011
Mínimo	2,448	-0,038	1,421	0,080	0,092	-0,547	-0,259	0,099	-0,228	-0,115	-0,120	-0,177	-0,111	-0,049	-0,006
Variação	1,378	0,058	1,352	1,090	0,686	0,671	0,439	0,396	0,440	0,322	0,269	0,254	0,151	0,175	0,017
ABR															
Médio	3,934	0,069	3,566	0,608	0,654	-0,354	-0,170	0,295	0,014	0,187	-0,062	-0,063	0,100	0,056	0,014
Máximo	5,011	0,130	4,741	1,168	1,127	-0,079	-0,069	0,606	0,253	0,395	0,133	0,078	0,194	0,152	0,032
Mínimo	2,960	0,034	2,936	-0,262	0,388	-0,847	-0,409	0,060	-0,199	0,071	-0,158	-0,144	0,066	-0,063	0,005
Variação	2,051	0,096	1,805	1,430	0,739	0,768	0,340	0,546	0,452	0,324	0,291	0,222	0,128	0,215	0,027
JUL															
Médio	2,387	0,073	2,509	0,001	0,609	-0,229	-0,091	0,169	-0,016	0,101	-0,002	-0,085	-0,062	-0,044	0,012
Máximo	2,910	0,094	3,089	0,470	1,034	0,134	0,220	0,379	0,158	0,310	0,151	-0,045	-0,044	0,069	0,022
Mínimo	1,297	0,045	1,662	-0,423	0,350	-0,527	-0,230	-0,064	-0,214	-0,059	-0,109	-0,145	-0,085	-0,092	0,005
Variação	1,613	0,049	1,427	0,893	0,684	0,661	0,450	0,443	0,372	0,369	0,260	0,100	0,041	0,161	0,017
OUT															
Médio	5,555	0,053	4,362	1,246	0,719	-0,529	-0,302	0,429	-0,164	-0,161	0,056	-0,206	-0,038	0,005	0,018
Máximo	6,753	0,121	5,506	2,457	1,020	-0,109	-0,093	0,720	0,161	0,168	0,184	-0,080	0,141	0,213	0,028
Mínimo	2,287	0,015	2,384	0,373	0,281	-1,096	-0,559	0,078	-0,343	-0,367	-0,189	-0,375	-0,193	-0,178	0,009
Variação	4,466	0,106	3,122	2,084	0,739	0,987	0,466	0,642	0,504	0,535	0,373	0,295	0,334	0,391	0,019
J_A_J_O															
Médio	3,713	0,053	3,167	0,636	0,598	-0,341	-0,171	0,301	-0,050	0,046	-0,003	-0,106	-0,025	0,016	0,012
Máximo	6,753	0,130	5,506	2,457	1,127	0,134	0,220	0,720	0,253	0,395	0,184	0,078	0,194	0,213	0,032
Mínimo	1,297	-0,038	1,421	-0,423	0,092	-1,096	-0,559	-0,064	-0,343	-0,367	-0,189	-0,375	-0,193	-0,178	-0,006
Variação	5,456	0,168	4,085	2,880	1,035	1,230	0,779	0,784	0,596	0,762	0,373	0,453	0,387	0,391	0,038

Desvio padrão dos coeficientes

COEF	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
JAN															
Médio	0,0072	0,0004	0,0041	0,0039	0,0029	0,0029	0,0026	0,0026	0,0025	0,0025	0,0024	0,0024	0,0022	0,0023	0,0003
Máximo	0,0083	0,0005	0,0049	0,0046	0,0035	0,0034	0,0031	0,0032	0,0030	0,0029	0,0028	0,0029	0,0028	0,0028	0,0003
Mínimo	0,0038	0,0003	0,0021	0,0017	0,0013	0,0022	0,0012	0,0012	0,0019	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0002
Variação	0,0045	0,0002	0,0028	0,0029	0,0022	0,0012	0,0019	0,0020	0,0011	0,0018	0,0017	0,0018	0,0017	0,0017	0,0001
ABR															
Médio	0,0113	0,0007	0,0063	0,0066	0,0045	0,0046	0,0041	0,0041	0,0038	0,0038	0,0037	0,0035	0,0035	0,0037	0,0004
Máximo	0,0146	0,0009	0,0083	0,0088	0,0060	0,0063	0,0053	0,0055	0,0048	0,0051	0,0049	0,0048	0,0048	0,0048	0,0005
Mínimo	0,0083	0,0005	0,0046	0,0046	0,0032	0,0033	0,0032	0,0029	0,0028	0,0028	0,0027	0,0027	0,0029	0,0030	0,0003
Variação	0,0063	0,0004	0,0037	0,0042	0,0028	0,0030	0,0021	0,0026	0,0020	0,0023	0,0022	0,0021	0,0019	0,0018	0,0002
JUL															
Médio	0,0074	0,0004	0,0043	0,0040	0,0029	0,0030	0,0028	0,0026	0,0025	0,0025	0,0025	0,0024	0,0023	0,0023	0,0002
Máximo	0,0090	0,0005	0,0053	0,0049	0,0035	0,0036	0,0033	0,0032	0,0030	0,0029	0,0030	0,0029	0,0025	0,0027	0,0003
Mínimo	0,0061	0,0004	0,0034	0,0033	0,0024	0,0024	0,0024	0,0021	0,0020	0,0021	0,0021	0,0020	0,0020	0,0020	0,0002
Variação	0,0029	0,0001	0,0019	0,0016	0,0011	0,0012	0,0009	0,0011	0,0010	0,0008	0,0009	0,0009	0,0005	0,0007	0,0001
OUT															
Médio	0,0147	0,0009	0,0084	0,0086	0,0059	0,0061	0,0054	0,0053	0,0048	0,0052	0,0048	0,0049	0,0045	0,0046	0,0005
Máximo	0,0182	0,0011	0,0106	0,0107	0,0076	0,0074	0,0069	0,0067	0,0058	0,0064	0,0062	0,0061	0,0054	0,0055	0,0006
Mínimo	0,0078	0,0005	0,0046	0,0069	0,0032	0,0032	0,0028	0,0029	0,0028	0,0042	0,0026	0,0040	0,0026	0,0025	0,0002
Variação	0,0104	0,0006	0,0060	0,0038	0,0044	0,0042	0,0041	0,0038	0,0030	0,0022	0,0036	0,0021	0,0028	0,0030	0,0004
J_A_J_O															
Médio	0,0101	0,0006	0,0058	0,0058	0,0041	0,0042	0,0038	0,0037	0,0034	0,0036	0,0033	0,0033	0,0031	0,0032	0,0003
Máximo	0,0182	0,0011	0,0106	0,0107	0,0076	0,0074	0,0069	0,0067	0,0058	0,0064	0,0062	0,0061	0,0054	0,0055	0,0006
Mínimo	0,0038	0,0003	0,0021	0,0017	0,0013	0,0022	0,0012	0,0012	0,0019	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0002
Variação	0,0144	0,0008	0,0085	0,0090	0,0063	0,0052	0,0057	0,0055	0,0039	0,0053	0,0051	0,0050	0,0043	0,0044	0,0004

Erro sistemático em L1, devido aos receptores

Estação	UEPP	PARA	VICO	BOMJ	BRAZ	CUIB	FORT	IMPZ	MANA
JAN									
Médio	5,848	6,413	6,542			4,773	0,483		7,300
Máximo	6,751	7,312	7,093			5,490	1,128		8,556
Mínimo	4,672	5,238	5,359			4,151	0,104		6,690
Variação	2,079	2,074	1,734			1,339	1,024		1,866
ABR									
Médio	4,870	4,425	4,935	5,303		4,813	0,788	5,573	7,651
Máximo	6,117	5,693	6,335	5,852		5,450	1,528	6,401	8,426
Mínimo	3,813	2,920	4,111	4,677		4,187	0,095	5,081	7,050
Variação	2,304	2,773	2,224	1,175		1,263	1,433	1,320	1,376
JUL									
Médio	4,768	5,432	4,913	4,922	6,496	4,822	1,192	5,801	7,686
Máximo	5,071	7,084	6,299	5,115	7,960	6,190	2,106	7,579	9,701
Mínimo	4,217	4,480	4,424	4,645	6,072	4,270	0,208	5,405	6,996
Variação	0,854	2,604	1,875	0,470	1,888	1,920	1,898	2,174	2,705
OUT									
Médio	6,681	7,616	6,648	6,221	7,916	5,573	1,173	6,347	7,963
Máximo	8,425	9,484	8,294	6,426	9,474	6,993	2,496	7,507	9,912
Mínimo	5,726	6,102	5,592	5,820	7,286	4,985	0,242	5,293	7,127
Variação	2,699	3,382	2,702	0,606	2,188	2,008	2,254	2,214	2,785
J_A_J_O									
Médio	5,553	6,101	5,697	5,248	7,206	4,997	0,886	5,900	7,651
Máximo	8,425	9,484	8,294	6,426	9,474	6,993	2,496	7,579	9,912
Mínimo	3,813	2,920	4,111	4,645	6,072	4,151	0,095	5,081	6,690
Variação	4,612	6,564	4,183	1,781	3,402	2,842	2,401	2,498	3,222

Desvio padrão do erro sistemático em L1 - receptores

Estação	UEPP	PARA	VICO	BOMJ	BRAZ	CUIB	FORT	IMPZ	MANA
JAN									
Médio	0,0000	0,0087	0,0087			0,0088	0,0093		0,0089
Máximo	0,0000	0,0105	0,0105			0,0105	0,0111		0,0108
Mínimo	0,0000	0,0047	0,0046			0,0048	0,0073		0,0048
Variação	0,0000	0,0058	0,0059			0,0057	0,0038		0,0060
ABR									
Médio	0,0000	0,0164	0,0150	0,0158		0,0152	0,0166	0,0151	0,0156
Máximo	0,0000	0,0197	0,0202	0,0206		0,0200	0,0245	0,0199	0,0202
Mínimo	0,0000	0,0130	0,0001	0,0103		0,0101	0,0102	0,0100	0,0100
Variação	0,0000	0,0067	0,0201	0,0103		0,0099	0,0143	0,0099	0,0102
JUL									
Médio	0,0000	0,0108	0,0105	0,0114	0,0107	0,0108	0,0114	0,0107	0,0108
Máximo	0,0000	0,0191	0,0135	0,0138	0,0137	0,0135	0,0144	0,0135	0,0136
Mínimo	0,0000	0,0087	0,0088	0,0094	0,0088	0,0089	0,0095	0,0090	0,0089
Variação	0,0000	0,0104	0,0047	0,0044	0,0049	0,0046	0,0049	0,0045	0,0047
OUT									
Médio	0,0000	0,0194	0,0200	0,0207	0,0202	0,0197	0,0211	0,0196	0,0200
Máximo	0,0000	0,0252	0,0261	0,0228	0,0267	0,0255	0,0262	0,0255	0,0255
Mínimo	0,0000	0,0151	0,0163	0,0191	0,0157	0,0157	0,0162	0,0153	0,0156
Variação	0,0000	0,0101	0,0098	0,0037	0,0110	0,0098	0,0100	0,0102	0,0099
J_A_J_O									
Médio	0,0000	0,0137	0,0130	0,0148	0,0154	0,0136	0,0141	0,0151	0,0137
Máximo	0,0000	0,0252	0,0261	0,0228	0,0267	0,0255	0,0262	0,0255	0,0255
Mínimo	0,0000	0,0047	0,0001	0,0094	0,0088	0,0048	0,0073	0,0090	0,0048
Variação	0,0000	0,0205	0,0260	0,0134	0,0179	0,0207	0,0189	0,0165	0,0207

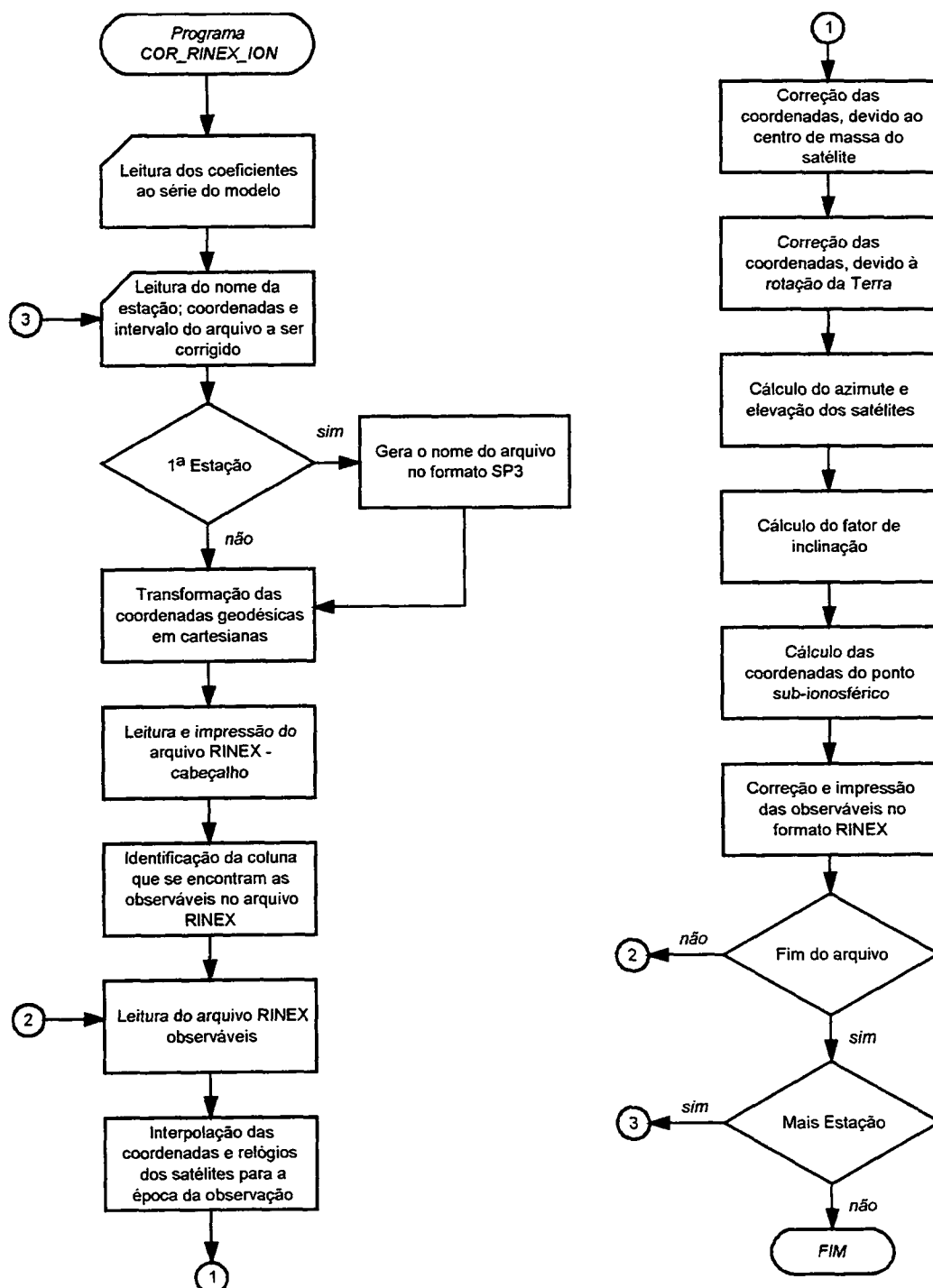
Erro sistemático em L1, devido aos satélites

SAT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	
JAN																												
Médio	0,145	0,5	-0,138	-0,527	0,114	-0,189	0,481	-0,025	-0,189	0,404		0,327	0,81	0,75	0,851	-0,377	0,196	0,494	-0,258	0,287	0,9	-1,2	-0,544	-0,148	-1,329	-0,814	-0,594	
Máximo	0,704	1,229	0,495	0,200	0,640	0,832	0,836	0,471	0,161	0,917		0,876	1,383	1,224	1,276	0,305	1,067	1,402	0,154	0,809	1,265	-0,773	-0,073	0,136	-0,895	0,538	0,053	
Mínimo	-0,520	-0,436	-0,522	-1,065	-0,091	-0,666	-0,171	-0,199	-0,427	-0,110		-0,233	0,258	0,275	0,385	-1,060	-1,290	-0,102	-0,933	-0,531	0,377	-1,752	-1,173	-0,674	-1,776	-1,168	-1,945	
Variação	1,224	1,665	1,017	1,265	0,731	1,498	1,007	0,670	0,588	1,027		1,109	1,125	0,949	0,891	1,365	2,357	1,504	1,087	1,340	0,888	0,979	1,100	0,810	0,881	1,706	1,998	
ABR																												
Médio	0,214	0,781	0,110	-0,909	0,336	0,320	0,616	0,192	0,041	0,654	-2,383	0,554	0,412	1,287	1,110	-0,401	-0,455	0,737	0,183	0,581	0,792	-1,138	-0,603	-0,580	-1,090	-0,767	-0,618	
Máximo	0,796	1,629	0,762	0,249	0,883	0,963	1,120	0,596	0,555	1,490	-1,217	1,178	1,015	1,745	2,019	0,233	1,108	1,188	0,830	1,184	1,203	-0,408	0,189	0,361	-0,058	-0,223	0,288	
Mínimo	-0,518	0,075	-0,466	-2,117	-0,064	-0,074	0,069	-0,195	-0,429	-0,150	-3,240	0,015	-0,278	0,748	0,229	-0,988	-1,198	0,373	-0,198	0,138	0,308	-1,823	-1,436	-1,312	-2,068	-1,102	-1,761	
Variação	1,314	1,554	1,228	2,366	0,947	1,037	1,051	0,791	0,984	1,640	2,023	1,163	1,293	0,997	1,790	1,221	2,306	0,815	1,028	1,046	0,895	1,415	1,625	1,673	2,010	0,879	2,049	
JUL																												
Médio	0,513	0,042	0,205	-1,092	-0,138	0,063	-0,287	-0,361	-0,577	0,839	-2,248	0,628	0,727	1,178	1,004	-0,089	0,117	0,628	0,280	0,709	0,643	-0,554	-0,362	0,100	-0,708	-1,133	-0,331	
Máximo	0,936	0,755	0,778	-0,478	0,238	0,743	0,177	0,482	0,074	1,841	-1,878	1,081	1,024	1,624	1,688	0,478	0,960	1,039	0,661	1,023	1,282	-0,220	1,493	1,193	-0,340	-0,481	0,483	
Mínimo	-0,123	-0,596	-0,499	-2,000	-0,625	-0,434	-0,979	-1,105	-1,238	-0,451	-3,125	0,222	0,366	0,654	0,184	-0,636	-0,555	0,066	-0,172	0,099	-0,199	-0,887	-1,323	-0,664	-1,655	-1,744	-1,014	
Variação	1,059	1,351	1,277	1,522	0,863	1,177	1,156	1,587	1,312	2,292	1,247	0,859	0,658	0,970	1,504	1,114	1,515	0,973	0,833	0,924	1,481	0,667	2,816	1,857	1,315	1,263	1,497	
OUT																												
Médio	0,347	0,682	0,340	-0,611	-0,013	-0,201	0,212	-0,341	-0,833	0,697	-2,315	1,099	1,182	1,358	0,170	0,503	0,726	0,864	-0,057	0,019	0,548	-1,575	-1,078	0,380	-1,084	-1,050	-0,072	
Máximo	1,126	1,630	1,190	-0,201	0,643	1,548	0,713	0,318	-0,215	1,464	-1,805	1,720	2,137	2,235	1,272	1,173	1,268	1,805	1,043	1,220	1,347	0,283	-0,385	1,147	-0,120	-0,322	1,261	
Mínimo	-0,693	-0,016	-0,624	-1,170	-0,507	-1,100	-0,280	-0,952	-1,308	0,108	-2,776	0,334	-0,254	0,715	-1,087	-0,036	0,004	-0,155	-1,134	-1,131	-0,041	-2,906	-1,753	-0,555	-2,102	-1,696	-1,535	
Variação	1,819	1,646	1,814	0,969	1,150	2,648	0,993	1,270	1,093	1,356	0,971	1,386	2,391	1,520	2,359	1,209	1,264	1,960	2,177	2,351	1,388	3,189	1,368	1,702	1,982	1,374	2,796	
J_A_J_O																												
Médio	0,307	0,503	0,132	-0,777	0,067	-0,002	0,251	-0,138	-0,397	0,648	-2,316	0,652	0,786	1,154	0,777	-0,088	0,155	0,68	0,055	0,4	0,718	-1,127	-0,655	-0,067	-1,048	-0,942	-0,402	
Máximo	1,126	1,63	1,19	0,249	0,883	1,548	1,12	0,596	0,555	1,841	-1,217	1,72	2,137	2,235	2,019	1,173	1,268	1,805	1,043	1,22	1,347	0,283	1,493	1,193	-0,058	0,538	1,261	
Mínimo	-0,693	-0,596	-0,624	-2,117	-0,625	-1,1	-0,979	-1,105	-1,308	-0,451	-3,24	-0,233	-0,278	0,275	-1,087	-1,06	-1,29	-0,155	-1,134	-1,131	-0,199	-2,906	-1,753	-1,312	-2,102	-1,744	-1,945	
Variação	1,819	2,226	1,814	2,366	1,508	2,648	2,099	1,701	1,863	2,292	2,023	1,953	2,415	1,96	3,106	2,233	2,558	1,96	2,177	2,351	1,546	3,189	3,246	2,505	2,044	2,282	3,206	

Desvio padrão do erro sistemático em L1, devido aos satélites

SAT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31
JAN																											
Médio	0,019	0,02	0,018	0,022	0,019	0,018	0,02	0,019	0,019	0,022		0,019	0,018	0,021	0,018	0,02	0,019	0,018	0,02	0,018	0,021	0,02	0,02	0,019	0,017	0,018	0,02
Máximo	0,023	0,027	0,021	0,026	0,022	0,023	0,025	0,022	0,022	0,026		0,023	0,021	0,026	0,021	0,024	0,024	0,021	0,023	0,022	0,024	0,023	0,023	0,023	0,021	0,021	0,023
Mínimo	0,014	0,015	0,013	0,017	0,014	0,013	0,015	0,014	0,014	0,016		0,014	0,013	0,016	0,014	0,015	0,014	0,013	0,015	0,014	0,015	0,015	0,015	0,014	0,013	0,014	0,015
Variação	0,008	0,013	0,008	0,009	0,008	0,01	0,01	0,008	0,008	0,01		0,009	0,008	0,011	0,007	0,009	0,01	0,008	0,009	0,008	0,009	0,009	0,009	0,009	0,008	0,008	0,009
ABR																											
Médio	0,03	0,029	0,029	0,035	0,031	0,031	0,032	0,031	0,031	0,033	0,029	0,028	0,028	0,028	0,029	0,029	0,029	0,029	0,031	0,03	0,033	0,031	0,033	0,03	0,028	0,029	0,032
Máximo	0,039	0,039	0,037	0,047	0,041	0,04	0,042	0,04	0,04	0,044	0,041	0,037	0,036	0,036	0,038	0,038	0,039	0,037	0,041	0,039	0,043	0,04	0,044	0,041	0,036	0,038	0,041
Mínimo	0,022	0,022	0,021	0,027	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,025	0,021	0,022	0,021	0,021	0,023	0,021	0,021	0,022	0,021	0,022	0,025	0,023	0,025	0,022	0,02	0,022	0,023
Variação	0,017	0,017	0,016	0,02	0,018	0,018	0,019	0,018	0,017	0,019	0,019	0,015	0,015	0,016	0,015	0,017	0,018	0,015	0,02	0,016	0,018	0,017	0,019	0,019	0,015	0,016	0,018
JUL																											
Médio	0,02	0,019	0,02	0,022	0,02	0,021	0,019	0,02	0,019	0,022	0,019	0,019	0,019	0,018	0,021	0,019	0,018	0,019	0,022	0,021	0,021	0,022	0,02	0,019	0,019	0,02	0,021
Máximo	0,025	0,023	0,025	0,027	0,025	0,027	0,023	0,024	0,023	0,026	0,022	0,024	0,023	0,022	0,027	0,023	0,022	0,024	0,027	0,026	0,026	0,026	0,024	0,023	0,023	0,023	0,025
Mínimo	0,016	0,015	0,017	0,018	0,016	0,017	0,016	0,016	0,015	0,018	0,015	0,016	0,016	0,015	0,017	0,015	0,015	0,016	0,018	0,017	0,017	0,018	0,016	0,015	0,016	0,017	0,017
Variação	0,008	0,007	0,008	0,009	0,009	0,01	0,008	0,008	0,008	0,009	0,008	0,008	0,007	0,007	0,01	0,008	0,007	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009	0,008	0,008	0,007	0,007	0,008
OUT																											
Médio	0,041	0,037	0,042	0,043	0,038	0,038	0,038	0,038	0,036	0,043	0,036	0,04	0,043	0,037	0,038	0,038	0,038	0,038	0,043	0,037	0,04	0,048	0,04	0,038	0,042	0,036	0,046
Máximo	0,051	0,045	0,051	0,053	0,048	0,048	0,046	0,048	0,046	0,054	0,045	0,051	0,057	0,045	0,047	0,048	0,046	0,053	0,053	0,045	0,05	0,06	0,049	0,048	0,055	0,044	0,061
Mínimo	0,033	0,029	0,034	0,033	0,03	0,028	0,03	0,03	0,029	0,036	0,03	0,032	0,034	0,029	0,03	0,029	0,031	0,031	0,037	0,031	0,032	0,037	0,031	0,03	0,034	0,029	0,036
Variação	0,018	0,016	0,017	0,021	0,018	0,02	0,016	0,018	0,017	0,019	0,016	0,019	0,024	0,016	0,017	0,019	0,016	0,023	0,017	0,015	0,019	0,024	0,019	0,019	0,021	0,016	0,025
J_A_J_O																											
Médio	0,027	0,026	0,027	0,031	0,027	0,027	0,027	0,027	0,026	0,03	0,028	0,027	0,027	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,028	0,026	0,029	0,03	0,028	0,026	0,027	0,026	0,029
Máximo	0,051	0,045	0,051	0,053	0,048	0,048	0,046	0,048	0,046	0,054	0,045	0,051	0,057	0,045	0,047	0,048	0,046	0,053	0,053	0,045	0,05	0,06	0,049	0,048	0,055	0,044	0,061
Mínimo	0,014	0,015	0,013	0,017	0,014	0,013	0,015	0,014	0,014	0,016	0,015	0,014	0,013	0,015	0,014	0,015	0,014	0,013	0,015	0,014	0,015	0,015	0,015	0,014	0,013	0,014	0,015
Variação	0,036	0,03	0,038	0,037	0,034	0,035	0,031	0,034	0,032	0,039	0,031	0,037	0,044	0,03	0,033	0,034	0,032	0,04	0,038	0,032	0,035	0,046	0,035	0,035	0,042	0,031	0,046

Anexo 05 - Fluxograma do programa – Correções das observáveis



Anexo 07 - Erro médio quadrático - Posicionamento por ponto - Estação UEPP

Dia_ano	L1 - SCI				L1 - CCI - P				L1 - CCI - P/F				L1 - CCI - F				P	P/F	F
	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RES (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RES (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RES (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RES (m)	REDUÇÃO (%)		
1	4,58	6,53	2,97	8,51	1,71	3,47	1,39	4,11	1,73	3,50	1,40	4,15	1,82	3,60	1,39	4,27	51,70	51,27	49,87
2	5,54	6,63	3,41	9,29	1,98	2,03	1,49	3,20	2,00	2,02	1,51	3,22	2,09	2,14	1,59	3,39	65,51	65,35	63,53
3	5,01	6,60	3,11	8,85	1,85	2,11	1,82	3,34	1,91	2,17	1,93	3,48	2,02	2,26	1,83	3,54	62,21	60,73	59,99
4	5,31	6,70	3,04	9,07	2,11	2,27	1,16	3,31	2,17	2,33	1,17	3,39	2,29	2,58	1,24	3,67	63,53	62,61	59,60
5	5,22	6,17	3,02	8,63	2,05	2,06	1,38	3,22	2,00	2,00	1,37	3,14	2,10	2,11	1,40	3,29	62,71	63,57	61,87
6	6,03	5,90	2,73	8,87	4,39	2,22	1,32	5,09	4,41	2,24	1,35	5,13	4,41	2,30	1,36	5,16	42,56	42,18	41,85
7	4,03	4,75	3,82	7,31	1,50	1,66	1,58	2,74	1,51	1,68	1,58	2,76	1,50	1,67	1,54	2,72	62,52	62,28	62,75
91	6,22	6,56	5,09	10,37	2,64	3,32	2,25	4,80	2,63	3,21	2,27	4,73	2,64	2,9	2,24	4,52	53,72	54,41	56,47
92	5,46	6,12	5,93	10,12	2,41	2,30	2,86	4,39	2,42	2,27	2,88	4,39	2,44	2,26	3,00	4,48	56,62	56,59	55,74
93	5,80	6,25	5,61	10,21	3,54	2,84	2,35	5,11	3,54	2,81	2,31	5,08	3,46	2,56	2,47	4,96	49,93	50,27	51,38
94	5,50	5,98	6,52	10,42	1,98	1,94	3,25	4,27	2,02	1,85	3,31	4,30	2,06	1,66	3,32	4,25	59,00	58,76	59,25
95	4,84	5,63	6,11	9,62	2,24	2,60	2,91	4,50	2,22	2,45	3,02	4,48	2,25	2,37	3,05	4,47	53,20	53,43	53,51
96	5,31	5,99	5,97	9,99	2,70	3,75	3,29	5,67	2,64	3,63	3,30	5,57	2,59	3,52	3,41	5,54	43,20	44,21	44,49
97	6,46	6,15	6,32	10,93	2,93	3,06	2,52	4,93	2,99	2,93	2,58	4,92	2,95	2,6	2,67	4,75	54,91	55,02	56,52
182	4,63	3,81	4,71	7,62	1,64	1,56	1,83	2,91	1,63	1,54	1,81	2,88	1,71	1,51	1,84	2,93	61,83	62,21	61,56
183	5,33	4,14	5,21	8,53	2,82	1,89	2,03	3,96	2,80	1,94	1,97	3,94	2,84	1,89	2,04	3,97	53,61	53,85	53,38
184	4,57	4,45	5,22	8,24	1,74	1,77	1,89	3,12	1,74	1,76	1,87	3,10	1,78	1,77	1,89	3,14	62,15	62,37	61,88
185	5,94	6,19	6,00	10,47	2,04	4,58	2,49	5,60	2,04	4,58	2,48	5,59	2,24	4,54	2,65	5,71	46,53	46,57	45,42
186	4,71	4,75	4,97	8,33	1,90	2,79	2,06	3,95	1,91	2,78	2,06	3,95	2,02	2,74	2,14	4,02	52,55	52,57	51,75
187	5,15	5,21	5,16	8,96	2,28	2,85	2,38	4,36	2,26	2,87	2,36	4,35	2,38	2,86	2,45	4,45	51,37	51,46	50,28
188	4,58	4,71	4,48	7,95	2,19	2,90	2,01	4,15	2,15	2,91	2,00	4,13	2,2	2,9	2,01	4,16	47,77	48,01	47,71
274	10,32	10,32	9,31	17,31	4,29	4,06	3,67	6,95	4,33	3,92	3,91	7,03	4,59	3,87	3,67	7,04	59,83	59,40	59,35
275	9,90	10,32	10,04	17,47	5,04	6,25	4,59	9,25	5,00	6,14	4,72	9,22	4,98	6,09	4,64	9,13	47,07	47,24	47,73
276	9,07	9,42	9,21	15,99	5,29	4,65	3,46	7,85	5,20	4,47	3,52	7,71	5,19	4,47	3,59	7,73	50,94	51,81	51,65
277	8,30	9,32	6,79	14,21	4,38	4,92	4,34	7,89	4,32	4,84	4,35	7,81	4,2	4,58	3,66	7,21	44,48	45,02	49,24
278	8,40	8,89	7,54	14,37	4,14	5,03	4,30	7,81	4,20	4,98	4,51	7,92	4,05	4,71	4,32	7,57	45,67	44,85	47,34
279	9,08	9,46	7,43	15,07	3,84	4,04	3,13	6,39	3,85	3,90	3,10	6,30	3,86	3,75	3,13	6,23	57,58	58,22	58,69
280	8,69	7,82	6,65	13,45	3,82	3,01	2,72	5,57	3,92	2,95	3,04	5,77	4,23	3,15	3,07	6,10	58,57	57,09	54,63
Máximo	10,32	10,32	10,04	17,47	5,29	6,25	4,59	9,25	5,20	6,14	4,72	9,22	5,19	6,09	4,64	9,13	65,51	65,35	63,53
Mínimo	4,03	3,81	2,73	7,31	1,50	1,56	1,16	2,74	1,51	1,54	1,17	2,76	1,50	1,51	1,24	2,72	42,56	42,18	41,85
Médio	6,21	6,60	5,58	10,72	2,84	3,07	2,52	4,94	2,84	3,02	2,56	4,94	2,89	2,98	2,58	4,94	54,33	54,33	54,19

Anexo 08 - Desvio padrão - Posicionamento por ponto - Estação UEPP

Dia_ano	L1 - SCI				L1 - CCI - P				L1 - CCI - P/F				L1 - CCI - F				P	P/F	F
	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RES (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RES (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RES (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RES (m)	REDUÇÃO (%)		
1	2,65	4,44	1,75	5,46	1,69	3,47	1,39	4,10	1,69	3,47	1,40	4,11	1,65	3,47	1,35	4,07	24,85	24,79	25,39
2	3,00	3,53	1,77	4,96	1,81	1,89	1,44	2,99	1,83	1,88	1,47	3,01	1,83	1,89	1,44	3,00	39,77	39,36	39,52
3	2,79	3,74	1,49	4,90	1,65	1,84	1,49	2,89	1,64	1,81	1,53	2,88	1,65	1,74	1,47	2,81	41,08	41,16	42,58
4	2,93	3,66	1,50	4,92	1,95	2,03	1,00	2,99	1,97	2,02	1,02	3,00	1,97	2,09	1,00	3,04	39,31	39,05	38,22
5	2,68	3,09	1,36	4,31	1,67	1,74	1,01	2,61	1,65	1,73	1,01	2,60	1,67	1,73	1,01	2,61	39,34	39,79	39,50
6	4,69	3,26	1,40	5,88	4,37	2,16	1,32	5,05	4,38	2,13	1,44	5,08	4,38	2,21	1,33	5,08	14,12	13,64	13,57
7	2,14	2,21	1,88	3,61	1,46	1,64	1,31	2,56	1,45	1,64	1,28	2,54	1,46	1,65	1,30	2,56	29,08	29,66	29,04
91	3,62	4,39	2,77	6,33	2,63	3,02	2,23	4,58	2,60	2,97	2,25	4,54	2,52	2,83	2,15	4,36	27,57	28,21	31,16
92	3,09	3,46	3,90	6,06	2,18	2,26	2,61	4,08	2,19	2,23	2,61	4,07	2,18	2,18	2,7	4,10	32,63	32,81	32,38
93	3,71	3,90	3,17	6,25	3,54	2,69	2,19	4,96	3,54	2,69	2,16	4,94	3,44	2,53	2,19	4,80	20,66	20,87	23,18
94	2,76	3,47	3,16	5,44	1,95	1,70	2,43	3,55	1,97	1,67	2,35	3,49	1,91	1,64	2,35	3,44	34,81	35,87	36,75
95	2,90	3,41	3,59	5,74	2,24	2,51	2,50	4,19	2,21	2,42	2,53	4,14	2,19	2,37	2,48	4,07	26,96	27,85	29,07
96	3,19	4,30	4,46	6,97	2,70	3,47	3,27	5,48	2,64	3,39	3,29	5,41	2,56	3,41	3,39	5,45	21,37	22,34	21,83
97	3,34	3,75	3,67	6,22	2,77	2,82	2,27	4,56	2,77	2,76	2,29	4,53	2,54	2,56	2,27	4,26	26,71	27,14	31,49
182	3,00	2,51	3,05	4,96	1,38	1,48	1,70	2,64	1,35	1,46	1,67	2,60	1,39	1,46	1,65	2,61	46,72	47,65	47,48
183	3,80	2,69	3,12	5,60	2,74	1,75	1,74	3,69	2,74	1,76	1,69	3,67	2,73	1,81	1,65	3,67	34,20	34,54	34,56
184	2,95	2,94	3,07	5,17	1,72	1,65	1,62	2,88	1,72	1,62	1,62	2,86	1,74	1,69	1,58	2,89	44,30	44,63	44,05
185	4,02	5,33	3,83	7,70	1,83	4,45	2,16	5,27	1,80	4,47	2,14	5,27	1,87	4,49	2,18	5,33	31,47	31,49	30,75
186	3,23	3,69	3,22	5,87	1,82	2,72	1,88	3,77	1,82	2,72	1,87	3,77	1,83	2,73	1,84	3,77	35,67	35,75	35,80
187	3,54	3,89	2,93	6,02	2,16	2,83	1,97	4,07	2,15	2,85	1,97	4,08	2,2	2,86	1,99	4,12	32,42	32,28	31,56
188	3,29	3,88	2,99	5,90	2,06	2,87	1,90	4,01	2,05	2,86	1,90	4,00	2,05	2,87	1,89	4,00	32,02	32,23	32,19
274	6,08	6,01	4,96	9,88	4,25	3,88	3,12	6,55	4,27	3,84	3,30	6,62	4,42	3,85	3,13	6,64	33,77	32,99	32,77
275	6,04	7,52	5,30	11,01	5,04	6,25	4,59	9,25	4,98	5,85	4,14	8,73	4,92	5,9	4,09	8,70	15,97	20,70	20,92
276	6,01	6,01	4,68	9,70	5,22	4,08	3,30	7,40	5,16	4,05	3,27	7,33	5,19	4,2	3,2	7,40	23,72	24,46	23,69
277	4,89	5,77	4,21	8,66	4,35	4,67	4,28	7,68	4,32	4,68	4,30	7,68	4,17	4,56	3,66	7,18	11,23	11,22	17,03
278	5,35	5,70	5,24	9,41	4,02	4,67	4,29	7,51	4,08	4,64	4,50	7,64	4,04	4,71	4,32	7,56	20,22	18,78	19,66
279	5,47	5,41	3,93	8,64	3,84	3,90	3,02	6,25	3,84	3,82	3,03	6,21	3,81	3,74	2,95	6,10	27,64	28,16	29,39
280	5,53	4,29	3,93	8,03	3,48	2,99	2,18	5,08	3,45	2,86	2,30	5,04	3,54	2,88	2,27	5,10	36,72	37,25	36,50
Máximo	6,08	7,52	5,30	11,01	5,22	6,25	4,59	9,25	5,16	5,85	4,50	8,73	5,19	5,90	4,32	8,70	46,72	47,65	47,48
Mínimo	2,14	2,21	1,36	3,61	1,38	1,48	1,00	2,56	1,35	1,46	1,01	2,54	1,39	1,46	1,00	2,56	11,23	11,22	13,57
Médio	3,81	4,15	3,23	6,56	2,73	2,91	2,29	4,67	2,72	2,87	2,30	4,64	2,71	2,86	2,24	4,60	30,15	30,52	31,07

Anexo 09 - Discrepâncias - Posicionamento por ponto - Estação UEPP

Dia_ano	L1 - SCI				L1 - CCI - P				L1 - CCI - P/F				L1 - CCI - F				P	P/F	F
	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	REDUÇÃO (%)		
1	0,07	-0,07	6,54	6,54	0,04	0,01	0,45	0,45	0,20	0,02	0,52	0,56	0,15	0,01	1,27	1,28	93,09	91,48	80,45
2	0,04	0,14	7,85	7,85	0,08	0,17	1,12	1,14	0,08	0,17	1,13	1,15	-0,09	0,16	1,57	1,58	85,54	85,41	79,87
3	0,05	-0,14	7,37	7,37	-0,46	0,02	1,62	1,68	-0,51	0,02	1,87	1,94	-0,31	0,00	2,13	2,15	77,15	73,70	70,80
4	0,24	-0,05	7,61	7,61	-0,04	-0,01	1,42	1,42	0,01	-0,02	1,57	1,57	0,03	-0,03	2,05	2,05	81,34	79,38	73,07
5	0,13	0,17	7,47	7,47	-0,27	0,24	1,83	1,87	-0,30	0,25	1,73	1,77	-0,24	0,23	1,98	2,01	75,04	76,27	73,13
6	0,17	-0,11	6,63	6,63	0,21	0,00	0,64	0,67	0,21	0,01	0,85	0,88	0,04	0,01	0,89	0,89	89,85	86,80	86,57
7	-1,04	0,05	6,27	6,36	-0,66	0,10	0,73	0,99	-0,64	0,09	0,89	1,10	-0,60	0,09	0,69	0,92	84,44	82,69	85,54
91	1,33	0,91	8,05	8,21	-0,61	1,07	-0,75	1,44	-0,56	1,03	-0,58	1,31	-0,6	1,02	0,22	1,20	82,43	84,07	85,34
92	-1,60	0,04	7,94	8,10	-0,76	0,52	1,36		-0,75	0,54	1,33	1,62	-0,78	0,49	1,55	1,80	83,25	80,00	77,74
93	-1,80	0,44	7,85	8,07	-1,06	0,60	-0,30	1,25	-0,96	0,60	-0,22	1,15	-1,1	0,58	0,35	1,29	84,45	85,70	83,98
94	-2,74	0,68	8,43	8,89	-2,20	0,82	0,30	2,37	-2,30	0,81	0,54	2,50	-2,06	0,79	1,13	2,48	73,38	71,91	72,12
95	-2,35	0,23	7,35	7,72	-1,57	0,44	0,11	1,63	-1,59	0,42	0,47	1,71	-1,51	0,37	1,01	1,85	78,83	77,84	75,99
96	-1,46	0,71	6,98	7,17	-0,68	0,88	-0,93	1,45	-0,65	0,87	-0,77	1,33	-0,54	0,84	-0,26	1,03	79,77	81,42	85,60
97	-2,03	1,28	8,66	8,99	-1,15	1,47	0,11	1,87	-1,13	1,49	0,39	1,91	-1,08	1,47	1,06	2,11	79,19	78,74	76,52
182	-1,65	0,97	5,46	5,79	-0,57	0,99	0,42	1,22	-0,56	1,01	0,44	1,24	-0,62	1,02	0,6	1,34	78,96	78,64	76,91
183	-2,06	0,96	6,01	6,43	-1,04	0,96	0,25	1,44	-1,03	0,97	0,14	1,42	-1,1	0,96	0,51	1,55	77,63	77,87	75,93
184	-2,11	0,64	6,02	6,41	-1,04	0,61	0,04	1,21	-1,00	0,62	0,00	1,18	-1,02	0,62	0,22	1,21	81,18	81,65	81,07
185	-2,33	1,46	6,54	7,09	-1,24	1,38	0,21	1,87	-1,24	1,39	0,29	1,89	-1,31	1,39	0,78	2,06	73,68	73,43	70,92
186	-1,82	0,81	5,58	5,92	-0,84	0,81	0,18	1,18	-0,82	0,80	0,25	1,17	-0,89	0,8	0,74	1,41	80,07	80,21	76,25
187	-2,03	0,76	6,27	6,63	-1,15	0,74	0,72	1,55	-1,14	0,75	0,62	1,50	-1,13	0,76	1	1,69	76,70	77,41	74,53
188	-1,56	0,82	5,03	5,33	-0,55	0,82	0,38	1,06	-0,59	0,83	0,24	1,05	-0,54	0,83	0,45	1,09	80,15	80,37	79,59
274	-2,87	1,27	13,86	14,21	-1,99	1,20	0,19	2,33	-1,91	1,26	0,83	2,43	-1,59	1,19	1,17	2,31	83,59	82,87	83,78
275	-3,98	1,72	12,86	13,57	-2,38	1,44	-0,72	2,87	-2,55	1,48	-0,22	2,96	-2,3	1,54	0,17	2,77	78,83	78,21	79,57
276	-3,62	0,79	12,16	12,71	-1,84	0,73	-1,71	2,62	-1,90	0,71	-1,25	2,38	-2,01	0,72	-0,64	2,23	79,42	81,26	82,47
277	-1,20	0,69	11,17	11,26	0,06	0,59	-1,64	1,74	0,21	0,57	-1,28	1,42	-0,08	0,55	0,04	0,56	84,51	87,41	95,05
278	-1,49	0,81	10,71	10,84	-0,77	0,40	-1,92	2,11	-0,54	0,37	-1,92	2,03	-0,58	0,38	-0,86	1,10	80,57	81,29	89,81
279	-1,86	0,82	12,18	12,35	-1,04	0,69	-0,40	1,31	-0,74	0,66	-0,19	1,01	-0,9	0,63	0,53	1,22	89,39	91,82	90,12
280	-1,47	1,16	10,62	10,78	-1,04	1,01	1,75	2,27	-1,18	1,01	2,34	2,81	-1,00	1,00	3,03	3,34	78,93	73,96	68,99
Máxima	1,33	1,72	13,86	14,21	0,21	1,47	1,83	2,87	0,21	1,49	2,34	2,96	0,15	1,54	3,03	3,34	93,09	91,82	95,05
Minima	-3,98	-0,14	5,03	5,33	-2,38	-0,01	-1,92	0,45	-2,55	-0,02	-1,92	0,56	-2,30	-0,03	-0,86	0,56	73,38	71,91	68,99
Média	-1,47	0,64	8,20	8,44	-0,88	0,67	0,20	1,59	-0,85	0,67	0,36	1,61	-0,85	0,66	0,84	1,66	81,12	80,78	79,70

Anexo 10 - Erro médio quadrático - Posicionamento por ponto - Estação UEPP

Dia_ano	L1 - SCI				L1 - CCI - P				L1 - CCI - P/F				L1 - CCI - F				P	P/F	F
	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	REDUÇÃO (%)		
1	1,94	2,31	7,96	8,51	1,90	2,18	2,92	4,11	1,90	2,18	2,92	4,11	1,90	2,17	3,14	4,26	51,72	51,72	49,91
2	1,39	1,68	9,02	9,28	1,37	1,16	2,66	3,21	1,37	1,16	2,68	3,23	1,36	1,17	2,87	3,38	65,42	65,24	63,53
3	1,50	1,53	8,59	8,85	1,60	1,16	2,69	3,34	1,63	1,16	2,84	3,47	1,51	1,12	3,00	3,54	62,30	60,76	60,01
4	1,44	1,34	8,85	9,07	1,32	0,95	2,89	3,32	1,32	0,96	2,97	3,39	1,32	0,98	3,28	3,67	63,42	62,62	59,53
5	1,02	1,31	8,47	8,63	1,00	1,04	2,88	3,22	1,02	1,03	2,79	3,14	1,00	1,04	2,96	3,29	62,68	63,57	61,85
6	1,67	2,76	8,26	8,87	1,64	2,60	4,07	5,10	1,64	2,61	4,10	5,13	1,62	2,60	4,15	5,16	42,48	42,15	41,83
7	1,52	1,23	7,04	7,31	1,21	0,96	2,27	2,75	1,20	0,94	2,30	2,76	1,19	0,95	2,26	2,73	62,42	62,24	62,70
91	2,63	2,06	9,82	10,37	2,11	1,73	3,95	4,80	2,11	1,70	3,87	4,72	2,13	1,72	3,59	4,51	53,72	54,45	56,47
92	3,24	2,28	9,39	10,19	2,65	1,73	3,07	4,41	2,66	1,73	3,04	4,39	2,72	1,75	3,10	4,48	56,74	56,88	56,04
93	2,90	2,27	9,52	10,21	2,34	2,03	4,07	5,11	2,26	2,03	4,06	5,07	2,36	2,04	3,87	4,97	49,89	50,32	51,30
94	3,62	1,77	9,61	10,42	3,18	1,55	2,39	4,27	3,15	1,56	2,47	4,30	3	1,53	2,59	4,25	59,03	58,77	59,23
95	3,58	1,77	8,75	9,62	2,89	1,46	3,12	4,50	2,91	1,44	3,08	4,48	2,84	1,45	3,13	4,47	53,25	53,47	53,54
96	3,38	2,29	9,12	9,99	3,12	2,06	4,26	5,67	3,07	2,05	4,17	5,57	3,06	2,05	4,14	5,54	43,28	44,26	44,54
97	3,27	2,57	10,11	10,93	2,60	2,25	3,53	4,93	2,58	2,28	3,51	4,92	2,54	2,32	3,28	4,75	54,92	55,02	56,52
182	2,39	1,58	7,06	7,62	1,65	1,47	1,89	2,91	1,64	1,46	1,86	2,88	1,65	1,47	1,92	2,93	61,84	62,23	61,58
183	2,87	2,17	7,73	8,53	2,09	2,10	2,62	3,96	2,08	2,10	2,60	3,94	2,1	2,1	2,64	3,97	53,61	53,83	53,40
184	2,80	1,39	7,62	8,24	1,88	1,10	2,23	3,12	1,86	1,08	2,23	3,10	1,86	1,09	2,29	3,15	62,15	62,38	61,81
185	3,47	3,11	9,37	10,46	2,68	2,95	3,94	5,60	2,66	2,95	3,94	5,59	2,7	2,96	4,07	5,71	46,45	46,54	45,43
186	2,73	1,76	7,68	8,34	2,01	1,57	3,02	3,95	2,00	1,56	3,02	3,94	2,02	1,57	3,1	4,02	52,60	52,70	51,80
187	2,65	1,79	8,37	8,96	1,94	1,61	3,55	4,35	1,94	1,59	3,55	4,35	1,93	1,61	3,68	4,46	51,41	51,49	50,26
188	2,25	1,92	7,38	7,95	1,54	1,78	3,42	4,15	1,55	1,77	3,40	4,13	1,53	1,76	3,43	4,15	47,78	48,00	47,83
274	4,24	3,05	16,50	17,31	3,34	2,38	5,62	6,96	3,61	2,50	0,83	4,47	3,02	2,53	5,84	7,04	59,80	74,18	59,30
275	5,12	3,07	16,42	17,47	3,81	2,33	8,10	9,25	3,83	2,35	8,00	9,18	3,78	2,42	7,96	9,14	47,06	47,48	47,70
276	4,63	3,26	14,96	16,00	3,04	3,15	6,52	7,85	3,09	3,09	6,35	7,71	3,23	3,15	6,28	7,73	50,90	51,81	51,66
277	3,26	3,48	13,38	14,20	3,24	3,49	6,28	7,88	3,27	3,53	6,16	7,82	2,94	3,62	5,49	7,20	44,51	44,97	49,29
278	3,80	3,07	13,50	14,36	3,55	2,96	6,29	7,81	3,60	3,07	6,35	7,92	3,53	3,12	5,92	7,57	45,63	44,84	47,30
279	3,02	3,05	14,44	15,06	2,54	2,48	5,31	6,39	2,37	2,46	5,29	6,30	2,43	2,49	5,16	6,22	57,60	58,20	58,69
280	3,05	3,07	12,73	13,45	2,52	2,42	4,34	5,57	2,63	2,42	4,52	5,76	2,48	2,44	5,01	6,10	58,56	57,14	54,64
Máximo	5,12	3,48	16,50	17,47	3,81	3,49	8,10	9,25	3,83	3,53	8,00	9,18	3,78	3,62	7,96	9,14	65,42	74,18	63,53
Mínimo	1,02	1,23	7,04	7,31	1,00	0,95	1,89	2,75	1,02	0,94	0,83	2,76	1,00	0,95	1,92	2,73	42,48	42,15	41,83
Médio	2,84	2,25	10,06	10,72	2,31	1,95	3,85	4,95	2,32	1,96	3,68	4,85	2,28	1,97	3,86	4,94	54,33	54,90	54,20

Anexo 11 - Desvio padrão - Posicionamento por ponto - Estação UEPP

Dia_ano	L1 - SCI				L1 - CCI - P				L1 - CCI - P/F				L1 - CCI - F				P	P/F	F
	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	Dlat (m)	Dlong (m)	Dh (m)	RES (m)	REDUÇÃO (%)		
1	1,94	2,31	4,55	5,46	1,89	2,18	2,89	4,08	1,90	2,18	2,92	4,11	1,89	2,17	2,87	4,06	25,20	24,72	25,55
2	1,39	1,67	4,46	4,96	1,36	1,15	2,41	3,00	1,36	1,15	2,42	3,00	1,36	1,16	2,41	3,00	39,60	39,43	39,52
3	1,50	1,52	4,40	4,89	1,54	1,16	2,14	2,88	1,55	1,16	2,14	2,89	1,48	1,12	2,11	2,81	41,11	41,00	42,54
4	1,42	1,34	4,52	4,92	1,31	0,95	2,51	2,99	1,32	0,96	2,52	3,00	1,32	0,98	2,56	3,04	39,35	39,02	38,21
5	1,01	1,30	3,99	4,32	0,96	1,01	2,22	2,62	0,97	1,00	2,19	2,60	0,97	1,01	2,20	2,61	39,27	39,87	39,58
6	1,66	2,76	4,92	5,88	1,62	2,60	4,02	5,05	1,62	2,61	4,01	5,05	1,62	2,60	4,05	5,08	14,05	14,10	13,64
7	1,11	1,23	3,21	3,61	1,01	0,95	2,15	2,56	1,02	0,94	2,12	2,53	1,03	0,95	2,15	2,57	29,18	29,87	28,96
91	2,27	1,85	5,61	6,33	2,02	1,36	3,88	4,58	2,04	1,36	3,83	4,55	2,04	1,38	3,59	4,35	27,61	28,14	31,20
92	2,81	2,25	4,87	6,06	2,54	1,65	2,73	4,08	2,55	1,64	2,73	4,08	2,61	1,67	2,69	4,10	32,67	32,63	32,24
93	2,27	2,23	5,37	6,24	2,08	1,94	4,06	4,96	2,05	1,94	4,05	4,94	2,09	1,95	3,58	4,58	20,58	20,92	26,61
94	2,37	1,63	4,62	5,44	2,30	1,31	2,37	3,55	2,15	1,34	2,41	3,50	2,17	1,31	2,33	3,44	34,72	35,75	36,74
95	2,69	1,76	4,74	5,73	2,42	1,39	3,12	4,19	2,44	1,38	3,04	4,14	2,41	1,4	2,97	4,07	26,91	27,80	28,88
96	3,05	2,18	5,87	6,97	3,05	1,86	4,16	5,48	3,00	1,86	4,10	5,41	3,01	1,87	4,13	5,44	21,27	22,32	21,87
97	2,56	2,22	5,21	6,21	2,34	1,70	3,52	4,56	2,32	1,73	3,48	4,53	2,3	1,8	3,1	4,26	26,70	27,17	31,47
182	1,73	1,25	4,48	4,96	1,55	1,09	1,84	2,64	1,54	1,05	1,81	2,60	1,53	1,06	1,83	2,61	46,78	47,64	47,40
183	2,00	1,95	4,86	5,61	1,82	1,87	2,60	3,68	1,80	1,86	2,60	3,67	1,8	1,87	2,59	3,67	34,29	34,55	34,59
184	1,84	1,24	4,68	5,18	1,57	0,92	2,23	2,88	1,56	0,89	2,23	2,86	1,55	0,9	2,28	2,90	44,43	44,72	44,01
185	2,58	2,75	6,71	7,70	2,37	2,61	3,93	5,28	2,36	2,60	3,93	5,27	2,37	2,62	4	5,34	31,41	31,53	30,66
186	2,03	1,57	5,27	5,86	1,83	1,35	3,01	3,77	1,82	1,34	3,01	3,76	1,82	1,35	3,01	3,77	35,64	35,78	35,72
187	1,71	1,63	5,54	6,02	1,57	1,42	3,48	4,07	1,57	1,40	3,49	4,07	1,56	1,41	3,54	4,12	32,37	32,34	31,63
188	1,61	1,74	5,40	5,90	1,44	1,58	3,40	4,02	1,44	1,56	3,39	4,00	1,44	1,55	3,4	4,00	31,90	32,18	32,10
274	3,12	2,77	8,96	9,88	2,68	2,04	5,61	6,54	3,06	2,15	5,42	6,59	2,57	2,23	5,71	6,65	33,80	33,38	32,75
275	3,23	2,54	10,21	11,01	3,81	2,33	8,10	9,25	2,99	1,82	7,99	8,72	3	1,87	7,95	8,70	15,96	20,74	20,95
276	2,89	3,17	8,70	9,70	2,42	3,07	6,29	7,41	2,43	3,01	6,22	7,32	2,53	3,07	6,24	7,40	23,65	24,49	23,71
277	3,03	3,41	7,36	8,66	3,24	3,44	6,06	7,68	3,26	3,48	6,02	7,68	2,94	3,58	5,49	7,18	11,25	11,31	17,04
278	3,50	2,96	8,22	9,41	3,46	2,93	5,98	7,50	3,56	3,04	6,05	7,65	3,53	3,12	5,92	7,57	20,26	18,72	19,61
279	2,38	2,94	7,77	8,64	2,32	2,38	5,29	6,25	2,25	2,37	5,28	6,21	2,26	2,41	5,13	6,10	27,71	28,15	29,39
280	2,68	2,84	7,02	8,03	2,30	2,20	3,97	5,09	2,35	2,20	3,87	5,03	2,27	2,23	3,99	5,10	36,66	37,34	36,47
Máximo	3,50	3,41	10,21	11,01	3,81	3,44	8,10	9,25	3,56	3,48	7,99	8,72	3,53	3,58	7,95	8,70	46,78	47,64	47,40
Mínimo	1,01	1,23	3,21	3,61	0,96	0,92	1,84	2,56	0,97	0,89	1,81	2,53	0,97	0,90	1,83	2,57	11,25	11,31	13,64
Médio	2,23	2,11	5,77	6,56	2,10	1,80	3,71	4,67	2,08	1,79	3,69	4,63	2,05	1,81	3,64	4,59	30,15	30,56	31,18

Anexo 12 - Coordenadas cartesianas das estações e discrepâncias - Linhas de base

ESTAÇÃO	Dist (Km)	L0			L1 - SCI			L1 - CCI			L1 - SCI			L1 - CCI			Redução		
		X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	ES (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	ES (m)	%
CICA - 1	9,850	3680174,120	-4623625,207	-2392679,501	3680174,14	-4623625,23	-2392679,51	3680174,129	-4623625,24	-2392679,52	0,021	-0,024	-0,005	0,032	0,009	-0,031	-0,018	0,037	
RRNN - B	17,929	3678575,898	-4619988,832	-2402336,743	3678575,9	-4619988,82	-2402336,71	3678575,89	-4619988,81	-2402336,72	0,004	0,016	0,037	0,041	-0,006	0,018	0,019	0,027	33,72
RRNN - A	19,696	3676168,792	-4621671,924	-2402879,944	3676168,950	-4621671,85	-2402879,93	3676168,79	-4621671,91	-2402879,94	0,158	0,076	0,016	0,176	-0,004	0,013	0,007	0,015	91,31
ESCO	41,989	3667858,521	-4648945,444	-2362771,22	3667858,48	-4648945,45	-2362771,370	3667858,430	-4648945,49	-2362771,32	-0,043	-0,003	-0,147	0,153	-0,091	-0,042	-0,101	0,142	7,12
SABE	42,534	3667019,120	-4649410,361	-2363068,37	3667019,19	-4649410,32	-2363068,3	3667019,12	-4649410,390	-2363068,28	0,068	0,042	0,068	0,105	0,001	-0,029	0,084	0,089	15,31
VENC	52,426	3658638,998	-4656653,627	-2361897,77	3658639,1	-4656653,39	-2361898,03	3658639,02	-4656653,400	-2361897,94	0,098	0,235	-0,261	0,365	0,019	0,227	-0,171	0,285	21,88
VEN2	52,426	3658638,998	-4656653,627	-2361897,77	3658639,26	-4656653,5	-2361898,14	3658639,21	-4656653,46	-2361898,05	0,266	0,124	-0,374	0,475	0,208	0,172	-0,284	0,392	17,59
LUCE -1	60,070	3729528,196	-4608419,13	-2345664,96	3729527,94	-4608419,36	-2345664,990	3729528,02	-4608419,23	-2345664,84	-0,252	-0,235	-0,031	0,346	-0,173	-0,101	0,115	0,231	33,23
LUCE -2	60,070	3729528,188	-4608419,17	-2345664,97	3729528,140	-4608419,46	-2345665,27	3729528,24	-4608419,34	-2345665,18	-0,048	-0,289	-0,307	0,424	0,047	-0,164	-0,218	0,277	34,77
MDIA - B	96,390	3612524,551	-4652881,12	-2438095,95	3612524,79	-4652881,230	-2438095,86	3612524,55	-4652881,36	-2438096	0,242	-0,113	0,090	0,282	0,002	-0,240	-0,054	0,246	12,71
MDIA - C	96,390	3612524,94	-4652881,600	-2438096,190	3612525,25	-4652881,56	-2438096,09	3612524,99	-4652881,63	-2438096,18	0,315	0,044	0,102	0,334	0,056	-0,032	0,015	0,066	80,17
MDIA - 2	96,390	3612524,96	-4652881,63	-2438096,2	3612525,66	-4652880,77	-2438096,08	3612525,239	-4652881,11	-2438096,23	0,699	0,858	0,123	1,114	0,275	0,517	-0,026	0,586	47,36
MDIA - 3	96,390	3612524,91	-4652881,590	-2438096,19	3612525	-4652881,45	-2438096,12	3612524,84	-4652881,71	-2438096,21	0,092	0,141	0,065	0,180	-0,069	-0,120	-0,025	0,141	22,06
PIST	103,604	3603540,22	-4665406,386	-2427814,19	3603540,65	-4665406,21	-2427814,11	3603540,4	-4665406,28	-2427814,17	0,425	0,181	0,086	0,470	0,181	0,111	0,025	0,214	54,50
PIS1	103,605	3603539,55	-4665406,900	-2427814,08	3603539,75	-4665406,93	-2427814,03	3603539,56	-4665406,88	-2427814,03	0,202	-0,026	0,051	0,210	0,012	0,021	0,045	0,051	75,67
PIS2	103,605	3603539,56	-4665406,918	-2427814,1	3603539,74	-4665406,75	-2427813,89	3603539,540	-4665406,89	-2427814,000	0,179	0,164	0,210	0,321	-0,022	0,033	0,096	0,104	67,64
EMBR - 1	109,882	3710630,920	-4556397,82	-2472874,25	3710630,766	-4556397,75	-2472873,7	3710630,79	-4556397,56	-2472873,89	-0,154	0,073	0,546	0,572	-0,131	0,265	0,362	0,467	18,29
EMBR - 2	109,883	3710631,04	-4556397,83	-2472874,25	3710630,89	-4556397,57	-2472874	3710631,020	-4556397,59	-2472874,12	-0,142	0,252	0,249	0,382	-0,015	0,240	0,129	0,273	28,50
EMBR - 3	109,882	3710631,02	-4556397,83	-2472874,24	3710630,350	-4556398,1	-2472874,03	3710630,610	-4556397,9	-2472874,16	-0,674	-0,270	0,208	0,755	-0,414	-0,064	0,078	0,426	43,58
E178 - A	115,620	3751982,230	-4540649,96	-2439787,41	3751982,24	-4540649,93	-2439787,37	3751982,31	-4540649,92	-2439787,420	0,014	0,030	0,043	0,054	0,077	0,040	-0,006	0,087	
E178 - B	115,620	3751982,26	-4540649,93	-2439787,42	3751982,15	-4540649,08	-2439786,97	3751982,52	-4540649,72	-2439787,54	-0,106	0,850	0,447	0,966	0,265	0,204	-0,122	0,356	63,16
E120 - A	153,719	3773857,6	-4513724,56	-2455615,14	3773858,11	-4513723,29	-2455614,75	3773858,4	-4513724,209	-2455615,48	0,508	1,268	0,395	1,422	0,804	0,346	-0,341	0,939	33,94
RONB	163,328	3566829,04	-5010341,77	-1686252,83	3566828,56	-5010342,26	-1686252,79	3566828,7	-5010342	-1686252,72	-0,485	-0,489	0,036	0,690	-0,337	-0,236	0,103	0,424	38,50
RONC	163,328	3566829,02	-5010341,75	-1686252,850	3566828,31	-5010342,23	-1686252,78	3566828,69	-5010342,14	-1686252,81	-0,703	-0,478	0,071	0,853	-0,329	-0,390	0,038	0,512	40,02
ROND	163,328	3566828,97	-5010341,72	-1686252,82	3566828,42	-5010342,17	-1686252,88	3566828,720	-5010341,88	-1686252,85	-0,550	-0,448	-0,059	0,712	-0,246	-0,164	-0,029	0,297	58,27
RONE	163,328	3566828,95	-5010341,71	-1686252,83	3566828,88	-5010341,900	-1686252,86	3566829,09	-5010341,67	-1686252,82	-0,065	-0,191	-0,032	0,204	0,137	0,043	0,003	0,144	29,69
RONF	163,328	3566829,09	-5010341,51	-1686252,77	3566828,45	-5010342,05	-1686252,69	3566828,820	-5010341,830	-1686252,68	-0,639	-0,535	0,081	0,837	-0,271	-0,319	0,092	0,429	48,82
E059 - A	189,992	3796760,56	-4487909,5	-2467636,360	3796761,54	-4487907,060	-2467635,17	3796761,15	-4487909,11	-2467636,55	0,977	2,436	1,188	2,881	0,592	0,383	-0,185	0,729	74,70
E059 - B	189,992	3796760,67	-4487909,2	-2467636,33	3796761,000	-4487908,63	-2467635,81	3796760,19	-4487908,74	-2467636,08	0,332	0,575	0,522	0,845	-0,479	0,468	0,245	0,713	15,57
LIN1	182,607	3835114,13	-4523164,69	-2341536,49	3835113,85	-4523164,760	-2341536,5	3835114,22	-4523164,740	-2341536,500	-0,278	-0,072	-0,006	0,287	0,093	-0,052	-0,008	0,107	62,80
LIN2	182,607	3835114,09	-4523164,79	-2341536,510	3835113,26	-4523165,31	-2341536,69	3835113,7	-4523165,02	-2341536,51	-0,826	-0,519	-0,179	0,992	-0,392	-0,231	0,005	0,455	54,12
E002 - A	211,561	3825708,01	-4473321,63	-2449618,09	3825706,92	-4473321,85	-2449617,17	3825707,5	-4473321,24	-2449617,24	-1,088	-0,219	0,923	1,443	-0,508	0,387	0,853	1,066	26,18
E002 - B	211,561	3825707,98	-4473321,58	-2449618,06	3825708,66	-4473321,94	-2449618,1	3825709,1	-4473321,66	-2449618,146	0,679	-0,354	-0,041	0,767	1,116	-0,077	-0,083	1,122	
Máxima											0,977	2,436	1,188	2,881	1,116	0,517	0,853	1,122	91,31
Minima											-1,088	-0,535	-0,374	0,032	-0,508	-0,390	-0,341	0,015	7,12
Média											-0,023	0,094	0,125	0,597	0,012	0,036	0,019	0,347	41,71

Anexo 13 - Desvio padrão das linhas de bases

ESTAÇÃO	Dist (Km)	Dp - Lo (cm)	Dp - L1 - SCI (cm)	Dp - L1 - CCI (cm)
CICA - 1	9,850	0,0936	0,0644	0,0644
RRNN - B	17,929	0,0981	0,0735	0,0782
RRNN - A	19,696	0,1704	2,4414	2,5609
ESCO	41,989	0,0708	1,4825	1,4937
SABE	42,534	0,1047	2,1783	2,1142
VENC	52,426	0,1700	1,1219	1,0503
VEN2	52,426	0,2300	1,6767	1,6391
LUCE -1	60,070	0,5702	5,3264	5,4980
LUCE -2	60,070	0,1242	5,8198	5,8104
MDIA - B	96,390	0,0923	2,9018	2,7367
MDIA - C	96,390	0,0863	2,4161	2,9020
MDIA - 2	96,390	0,1072	7,9415	7,2613
MDIA - 3	96,390	0,2971	1,6288	0,8857
PIST	103,604	0,1964	0,9332	0,8574
PIS1	103,605	0,3280	0,9031	0,6733
PIS2	103,605	0,3075	0,7180	0,8091
EMBR - 1	109,882	1,5149	8,5806	7,5524
EMBR - 2	109,883	0,0767	1,1151	1,0499
EMBR - 3	109,882	0,0869	1,4136	1,2828
E178 - A	115,620	0,0417	0,6574	0,6963
E178 - B	115,620	0,0797	6,5740	3,1499
E120 - A	153,719	0,2672	9,4455	6,4801
RONB	163,328	0,2855	2,1109	2,3695
RONC	163,328	0,8787	7,1561	6,5623
ROND	163,328	0,2713	1,6892	1,7632
RONE	163,328	0,3770	3,9582	3,7853
RONF	163,328	0,2426	2,9438	3,1539
E059 - A	189,992	0,1496	1,7486	6,4068
E059 - B	189,992	0,2346	3,2766	3,1139
LIN1	182,607	0,1150	2,4414	1,8219
4223	182,607	0,4223	1,8608	2,4110
E002 - A	211,561	0,7754	1,4927	1,4842
E002 - B	211,561	0,3632	4,6276	4,0872
Médio		0,280	2,991	2,837

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAARDA, W.. A testing procedure for use in geodetic networks. **Netherlands Geodetic Commission – Publication on Geodesy – News Series**, Delft, v.2, n.5, 1968.
- CAMARGO, P.O.. **Controle de qualidade aplicado ao filtro de Kalman**. Curitiba, 1992. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- CAMPOS, M.A.; WANNINGER, L.; SEEGER, G.. Condições ionosféricas perturbadas e os sinais GPS. In: **Resumos expandidos do 3º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro/RJ, nov. 1993, p.601-604.
- CHEN, Y.Q.; KAVOURAS, M.; CHRZANOWSKI, A. A strategy for detection of outlying observations in measurements of high precision. **The Canadian Surveyor**, Ottawa, v.41, n.4, p.529-540, winter 1987.
- COCO, D.S., COKER, C., DAHLKE, S.R., CLYNCH, J.R.. Mitigation on ionospheric effects for single frequency GPS user. In: **Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with Global Positioning System GPS-90**, The Institute of Navigation, Ottawa, Ontario, Canada, Sept. 1990, p.387-402.
- COCO, D.S.. GPS - Satellites of opportunity for ionospheric monitoring. **GPS World**, p.47-50, Oct. 1991.
- COCO, D.S., COKER, C., DAHLKE, S.R., CLYNCH, J.R.. Variability of GPS satellite differential group delay biases. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.27, n.6, p.931-938, Nov. 1991.
- COLOMBO, O.L.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J.M.; SANZ, J.; TALAYA, J.. Resolving carrier-phase ambiguities on the fly, at more than 100 Km from nearest reference site, with the help of ionospheric tomography. **Presented at the 12TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-99**, Nashville, Tennessee, Sept. 14-17, 1999.
- DAVIES, KENNETH. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990.
- FEES, W.A.; STEPHENS, S.G.. Evaluation of GPS ionospheric time delay model. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.23, n.3, p.332-338, 1987.

- FINN, A.; MATTHEWMAN, J.. A single frequency ionospheric refraction algorithm for Transit and GPS, In: **Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on satellite Positioning**, Las Cruces, New Mexico, Mar. 13-17, 1989, v.2, p.737-756.
- FORTES, L.P.S.. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)**. Rio de Janeiro, 1997. Dissertação (Mestrado), IME.
- GEMAEL, C.. **Geodésia Celeste: Introdução**. Curitiba, 1991. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- GEMAEL, C.. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.
- GEORGIADIOU, Y., KLEUSBERG, A.. On the effects ionospheric delay on geodetic relative GPS positioning. **Manuscripta Geodaetica**, v.13, n.1, p.1-8, 1988.
- GEORGIADIOU, Y.. Ionosphere delay modelling for GPS relative positioning. In: **Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with Global Positioning System GPS-90**, The Institute of Navigation, Ottawa, Ontario, Canada, Sept. 1990, p.403-410.
- GEORGIADIOU, Y.; DOUCET, K.D.. The issue of selective availability. **GPS World**, p.53-56, Sept./Oct. 1990.
- GEORGIADIOU, Y.; WEBSTER, I.; DELIKARAOGLU, D.. GPS ionospheric modelling for moving platforms. In: **Proceedings International Workshop on Global Positioning systems in Geosciences**, Technical University of Crete, Chania, Crete, June 8-10, 1992, p.392-399.
- GEORGIADIOU, Y.. Modelling the ionosphere for an active control network of GPS stations. **LGR-Series - Publications of the Delft Geodetic Computing Centre**, Delft University of Technology, n.7, Dec. 1994.
- GOAD, C. C.. Optimal filtering of pseudoranges and phases from single-frequency GPS receivers. **Journal of The Institute of Navigation**, v.37, n.3, p.249-262, Fall 1990.
- HARTMANN, G.K.; LEITINGER, R.. Range errors due to ionospheric and tropospheric effects for signal frequencies above 100 MHz. **Bulletin Géodésique**. Paris, v.58, n.2, p.109-136, 1984.
- HATCH, R.. The synergism of GPS code and carrier measurements. In: **Proceedings of the Third International Symposium on Satellite Doppler**

Positioning, Las Cruces, New Mexico, Feb. 8-12, 1982, v.2, p.1213-1231.

HATCH, R.R.. The promise of a third frequency. **GPS World**, p.55-58, May 1996.

HILL, C.J.; MOORE, T.. GRINGO – a RINEX logger for hand-held GPS receivers. **Presented at the 12TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-99**, Nashville, Tennessee, Sept. 14-17, 1999.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J.. **Global Positioning System Theory and Practice**. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 1993.

IBGE. **Sistema de referência geocêntrico para a América do Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 1997. (Relatório final: Grupo de trabalhos I e II / IBGE, Departamento de Geodésia)

INPE, **INPE-NOTÍCIAS - Publicação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, ano 3, n.11, jul./ago. 1997.

JIN. XX.. A recursive procedure for computation and quality control of GPS differential corrections. **LGR**, Delft Geodetic Computing Centre, Delft University of Technology, Faculty of Geodetic Engineering, The Netherlands, 1995.

JIN. XX.. **Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results**. Delft, 1996. PhD Thesis – Delft University of Technology.

JOHNSON, F.S.. **Satellite Environment Handbook**. 2. ed. California : Stanford University Press, 1965.

KIRCHHOFF, V.W.J.H.. **Introdução à Geofísica Espacial**. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP:FAPESP, 1991.

KLEUSBERG, A.. Ionospheric propagation effects in geodetic relative GPS positioning. **Manuscripta Geodaetica**, v.11, n.4, p.256-261, 1986.

KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric time-delay corrections for advanced satellite ranging system, **AGARD Conference Proceedings - Propagation Limitations of Navigation and Positioning Systems**, CP-209, Feb. 1977.

KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.AES-23, n.3, p.325-331, May 1987.

KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric effects on GPS. **GPS World**, p.48-50, Apr. 1991.

- KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric effects on GPS. In: **Global Positioning System: Theory and Applications**, Washington: Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1996. v.1, p.485-515.
- KOMJATHY, A.; LANGLEY, R.B.. The effect of shell height on high precision ionospheric modelling using GPS. **Presented at the IGS Workshop in Silver Spring**, MD, Mar. 19-21, 1996, p.193-203.
- KOMJATHY, A.; LANGLEY, R.B.. An assessment of predicted and measured ionospheric total electron content using a regional GPS network. **Presented at the ION GPS-96 National Technical Meeting**, Santa Monica, CA, Jan. 22-24, 1996.
- KRAKIWSKY, E.J.; BIACS, Z.F.. Least squares collocation and statistical testing. **Bulletin Géodésique**, Paris, v.64, n.01, p.73-87, 1990.
- KRARUP, T.; KUBIK, K.. The danish method for adjustment; discussion. In: **Suplement to the Proceedings - Symposium Mathematical Models, Accuracy Aspects and Quality Control**, Otaniemi, Helsinki University of Tecnology, 1982, p.26-29.
- LANGLEY, R.B.. The GPS error budget. **GPS World**, p.51-56, Mar. 1997.
- LANYI, G.E.; ROTH, T.. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. **Radio Science**, v.23, n.4, p.483-492, July/Aug. 1988.
- LACHAPELLE, G.; CANNON, E.. Single and dual frequency GPS results for baselines of 10 to 500 Km. **The Canadian Surveyor**, v.40, n.2, p173-183, 1986.
- LEICK, A.. **GPS Satellite Surveying**. 2.ed. New York : John Wiley & Sons, 1995.
- MCCARTHY, D.D.. IERS Conventions (1996). **IERS Technical Note**. Observatoire de Paris, Paris, IERS Technical Note 21, july, 1996.
- MIKHAIL, E.M.. **Observations and Least Squares**. New York: IEP-A Dun-Donnelley Publisher, 1976.
- MONICO, J.F.G.. **High Precision GPS Inter-continenta Networks**. Nottingham, 1995. PhD Thesis - University of Nottingham.
- MONICO, J.F.G.. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS : descrição, fundamentos e aplicações**. Presidente Prudente, 1998. Departamento de Cartografia, FCT/Unesp.
- MUNCK, J.C.. Tropospheric effects on baseline measurements by using (GPS)

satellites. **Reports of the Faculty of Geodetic Engineering Mathematical and Physical Geodesy**, n.91.3, June 1991.

NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B.; JANES, H.W.. Ionospheric modelling for single frequency users of the Global Positioning System: a status report. In: **Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with Global Positioning System GPS-90**, The Institute of Navigation, Ottawa, Ontario, Canada, Sept. 1990, p.429-443.

NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B.. Three alternative empirical ionospheric models - are they better than GPS broadcast model?, In : **Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning**, Columbus, OH, USA, Mar. 16-20, 1992, v.1, p.240-244.

NRCan. **User's Guide – GPSPACE (GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides – Version 3.2)**. Canadian Active Control System Operations, Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Natural Resources Canada, 1997.

OLIVEIRA, L.C. **Refração atmosférica nas medidas doppler**. Curitiba, 1990. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

OSÓRIO, I.M.T.V.P.. **O Sistema Global de Posicionamento na Orbitografia de Satélites de Baixa Altitude**. Portugal, 1992. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências, Universidade do Porto.

PICQUENARD, A.. **Propagação das ondas radioelétricas nos meios naturais**. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos S.A., 1974. (Biblioteca Técnica IBRAPE)

POPE, A.J.. The statistics of residuals and the detection of outliers. **NOAA Technical Report NOS 65 NGS**, 1976

SCHAER, S; GURTNER, W.; FELTENS, J.. IONEX: the IONosphere Map Exchange format version 1. In: **Proceedings of the IGS AC Workshop**, Darmstadt, Germany, Feb. 9 –11, 1998.

SCHAER, S.. **Towards a Combined Ionosphere Product**. IGS – New Projects & Applications, <<http://igscb.jpl.nasa.gov/projects/>>, 1998.

SARDON, E.; RIUS, A.; ZARRAOA, N. Ionospheric calibration of single frequency VLBI and GPS observations using dual GPS data. **Bulletin Géodésique**, Paris, v.68, p.230-235, 1984.

SARDON, E.; RIUS, A.; ZARRAOA, N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global

Positioning System observation. **Radio Science**, v.29, p.577-586, May/June, 1994.

SARDON, E.; ZARRAOA, N. Estimation of total electron content using GPS data: how stable are the differential satellite and receiver instrumental biases. **Radio Science**, v.32, p.1899-1910, Sept./Oct., 1997.

SEEBER, Gunter. **Satellite Geodesy : Foundations, Methods and Applications**. Berlin-New York : Walter de Gruyter, 1993

SPIKER, Jr., J.J.; VAN DEIRENDONCK, A.J.. Proposed new civil GPS signal at 1176.45 MHz. **Presented at the 12TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-99**, Nashville, Tennessee, Sept. 14-17, 1999.

STRANG, G.; BORRE, K.. **Linear Algebra, Geodesy, and GPS**. Wesley: Cambridge Press, 1997.

TEUNISSEN, P.J.. Quality control in geodetic networks. In: **Optimization and design of geodetic networks**, Berlin: Springer-Verlag, 1985, 606p., p.526-547.

TEUNISSEN, P.J.. The GPS phase-adjusted pseudorange. In: **Proceedings of the Second International Workshop on High Precision Navigation**, Stuttgart, Freudenstadt, Nov., 1991, p115-125.

TIBERIUS, C.; JONKMAN, N. KENSELAAR, F.. The stochastics of GPS observables. **GPS World**, p.49-54, Feb. 1999.

TRIMBLE. **GPSurvey – Software User's Guide**. Trimble Navigation Limited, 1996.

WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A.. Use of GPS in the south of Brazil under severe ionospheric conditions. In: **IAG Symposium 111**. Springer Verlag, Heidelberg, Aug. 13, 1991.

WANNINGER, L.; JAHN, C-H. Effects of severe ionospheric conditions on GPS data processing, **IAG Symposium G-2**, IUGG XX General Assembly, Aug. 16, 1991.

WANNINGER, L.; CAMPOS, M.A.. Equatorial scintillations and GPS receiver performance. **IFE-MEMO-WA 03/92**, Mar. 13, 1992. 5p.

WANNINGER, L.. Monitoring total ionospheric electron content and ionospheric irregularities with GPS. In: **Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy**, The Hague, The Netherlands, May 19-22, 1992, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, n.36.

WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A.. Limitations of GPS in equatorial

regions due to the ionosphere. In: **VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, May 10-14, 1993. In: **International Conference Cartography - Geodesy**, Maracaibo, Venezuela, Nov. 24 - Dec. 4, 1992.

WANNINGER, L.. Effects of the equatorial ionosphere on GPS. **GPS World**, p.48-54, July 1993.

WEBSTER, I., KLEUSBERG, A.. Regional Modelling of the Ionosphere for Single Frequency users of the Global Positioning System. **Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positionings**, Columbus, OH, USA, Mar. 16-20, 1992, v.1, p.230-239.

WEBSTER, I.; GEORGIADIOU, Y.; DELIKARAOGLOU, D.. GPS ionospheric modelling for moving platforms, In: **International Workshop on Global Positioning Systems in Geosciences**, Technical University of Crete, Chania, Greece, June 8-10, 1992.

WEBSTER, I.. **A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System**. New Brunswick, 1993. M.Sc.E Thesis - Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick.

WELLS, D.; BECK, N.; DELIKARAOGLOU, D.; KLEUSBERG, A.; KRAKIWSKY, E. J.; LACHAPPELLE, G.; LANGLEY, R. B.; NAKIBOGLU, M.; SCHWARZ, K. P.; TRANQUILLA, J. M.; VANICEK, P.. **Guide to GPS positioning**. Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick, 1986.

WILD, U., BEUTLER, G., GURTNER, W., ROTHACHER, M.. Estimating the ionosphere using one or more dual frequency GPS receivers. In: **Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on satellite Positioning**, Las Cruces, New Mexico, Mar. 13-17, 1989, v.2, p.724-736.

WILSON, B. D.; YINGER, C. H.; FEES, W. A.; SHANK, C.. New and improved the broadcast interfrequency biases. **GPS World**, v.10, n.9, p.56-66, Sept. 1999.

WÜBBENA, G.. The GPS adjustment software package GEONAP, concepts and models. In: **Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on satellite Positioning**, Las Cruces, New Mexico, Mar. 13-17, 1989, v.2, p.452-461.

ZHONG, D.. Robust estimation and optimal selection of polynomial parameter for the interpolation of GPS heights. **Journal of Geodesy**, Berlin, v.9, n.71, p.552-561, 1997.